

講演番号: THOB11

# 3GeV次世代放射光施設ナノテラスの蓄積リング 電磁石及び入射部電磁石の設置と試運転状況

量子科学技術研究開発機構(QST)

量子技術基盤研究部門

次世代放射光施設整備開発センター 加速器グループ

小原脩平

(obara.shuhei@qst.go.jp)

西森 信行, 安積 隆夫, 上島 考太, 保坂 勇志(量研), 青木 駿亮, 伊原 彰, 岩下 大器, 小林 創, 小林 秀樹(量研, NAT),  
渡部 貴宏, 近藤 力, 高野 史郎, 深見 健司, 田村 和宏, 大石 真也, 小路 正純(JASRI, 理研, 量研),  
青木 毅, 松原 伸一, 柳田 謙一, 川瀬 守弘, 谷内 努, 山口 博史, 増田 剛正, 上田 庸資(JASRI, 量研),  
稲垣 隆宏(理研, JASRI), 安積 則義(JASRI, 理研), 松井 佐久夫(理研),  
平岩 聡彦(理研), 井上 忍, 住友 博史, 森谷 佳津貴, 横町 和俊, 山本 龍, 酒井 康平, 吉岡 正倫(SES)

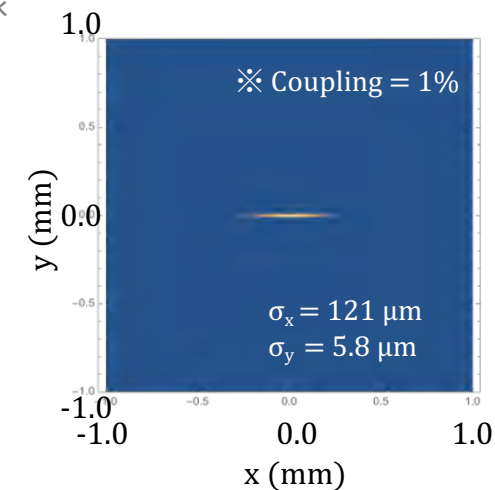
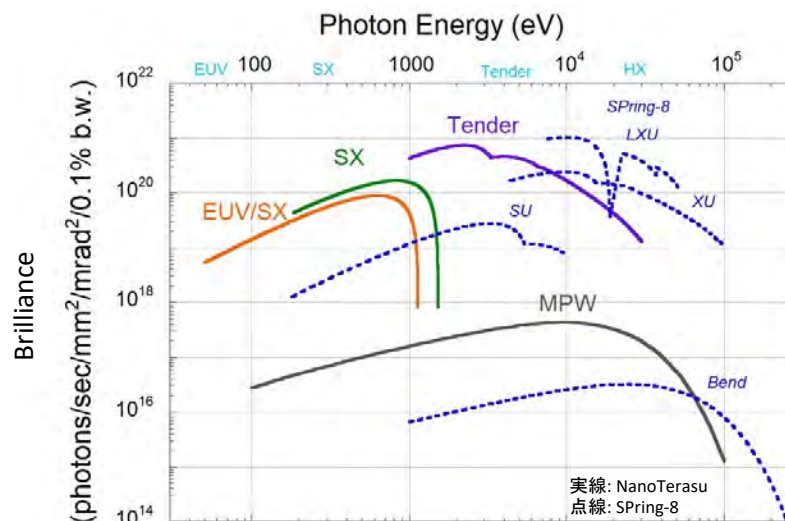
- 次世代放射光施設(NanoTerasu)について
- 電子蓄積リング(Storage-Ring: SR)の電磁石の設置
- SR入射部のパルス電磁石の調整
- まとめ



Photo courtesy of PhoSIC

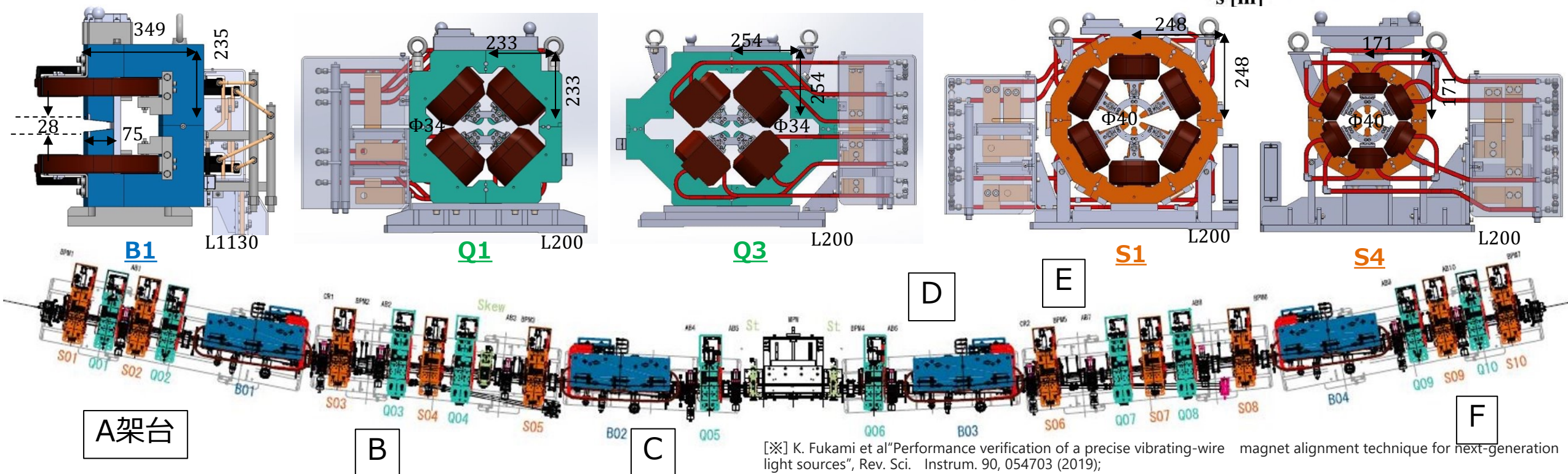
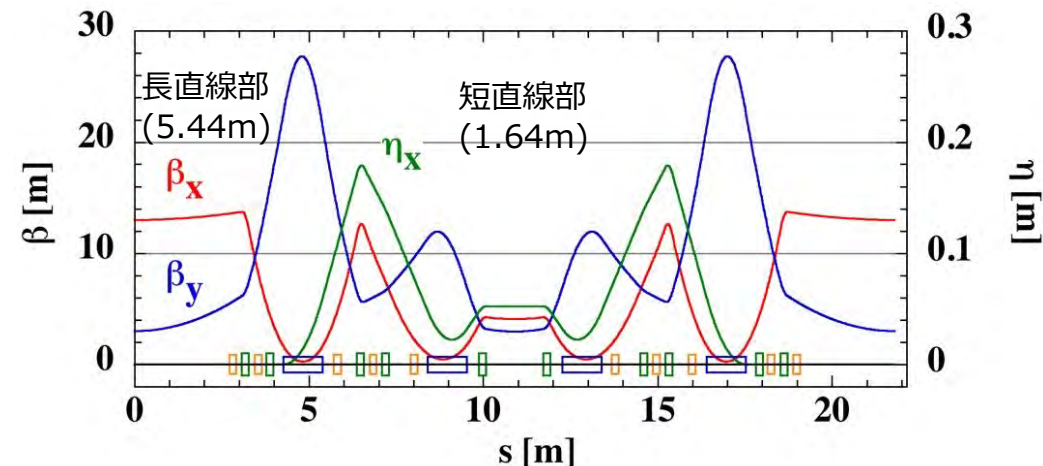
	NanoTerasu	SPrng-8
場所	宮城県	兵庫県
電子ビームエネルギー	3 GeV	8 GeV
蓄積電流	> 400 mA	100 mA
セル数	16	44
リング周長	349 m	1436 m
エミッタンス	1.14 nmrad	2.4 nmrad
消費電力	5 MW	40 MW
最大ビームライン数	28	63
メインのX線	Soft ~ Tender X線	Hard X線

- 宮城県仙台市東北大学キャンパス内に建設中の**次世代放射光施設**
- **小さいエミッタンスと高い輝度**
- 2024年から本格運用開始予定
- 2023年8月現在、加速器は100 mA以上蓄積を達成し、ビームオプティクスを調整中 ※ コミッシュニングについてはTUOP02で講演されました

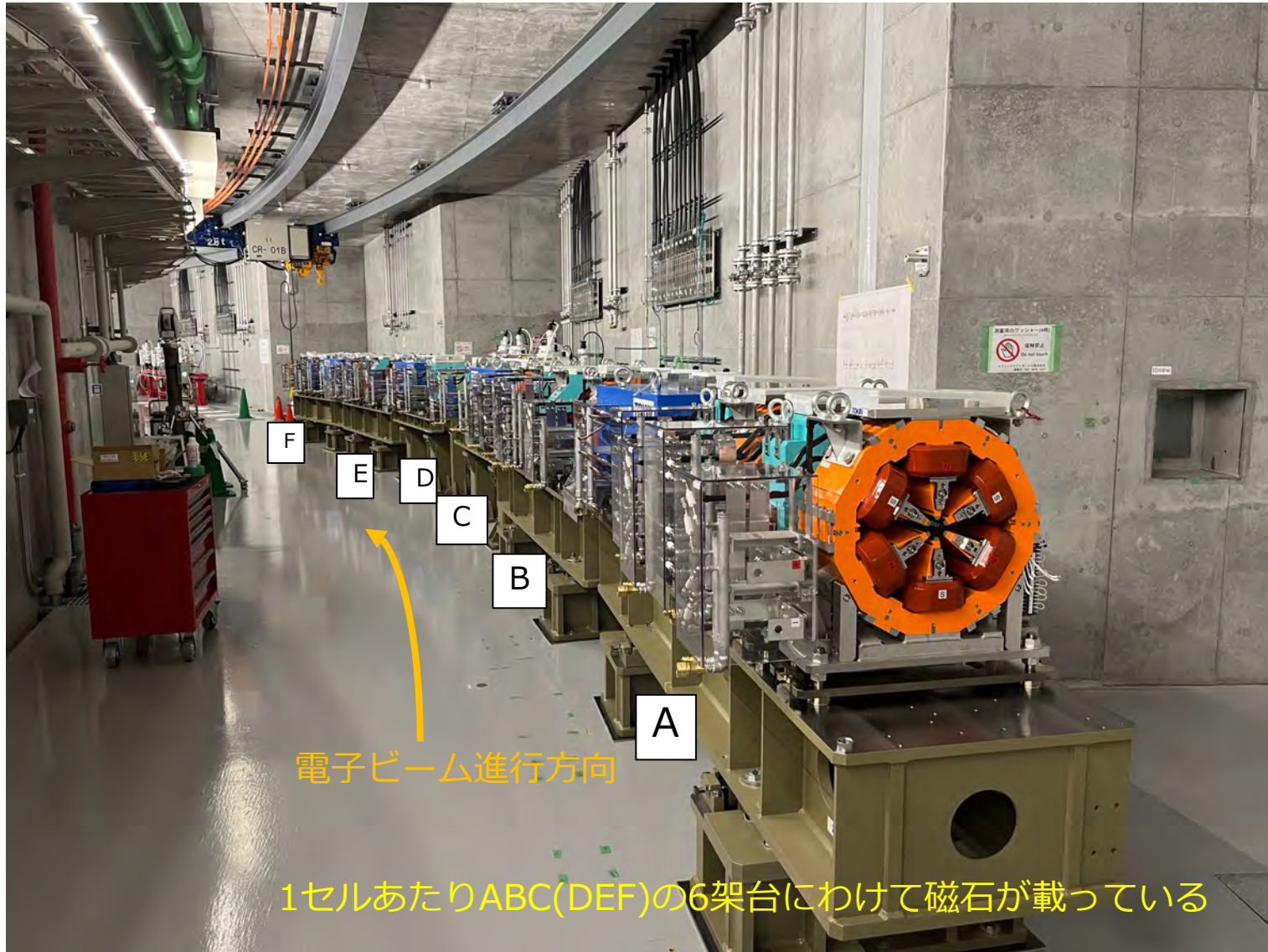


※ デザイン時のsimulationであり、現在のビームプロファイルではありません

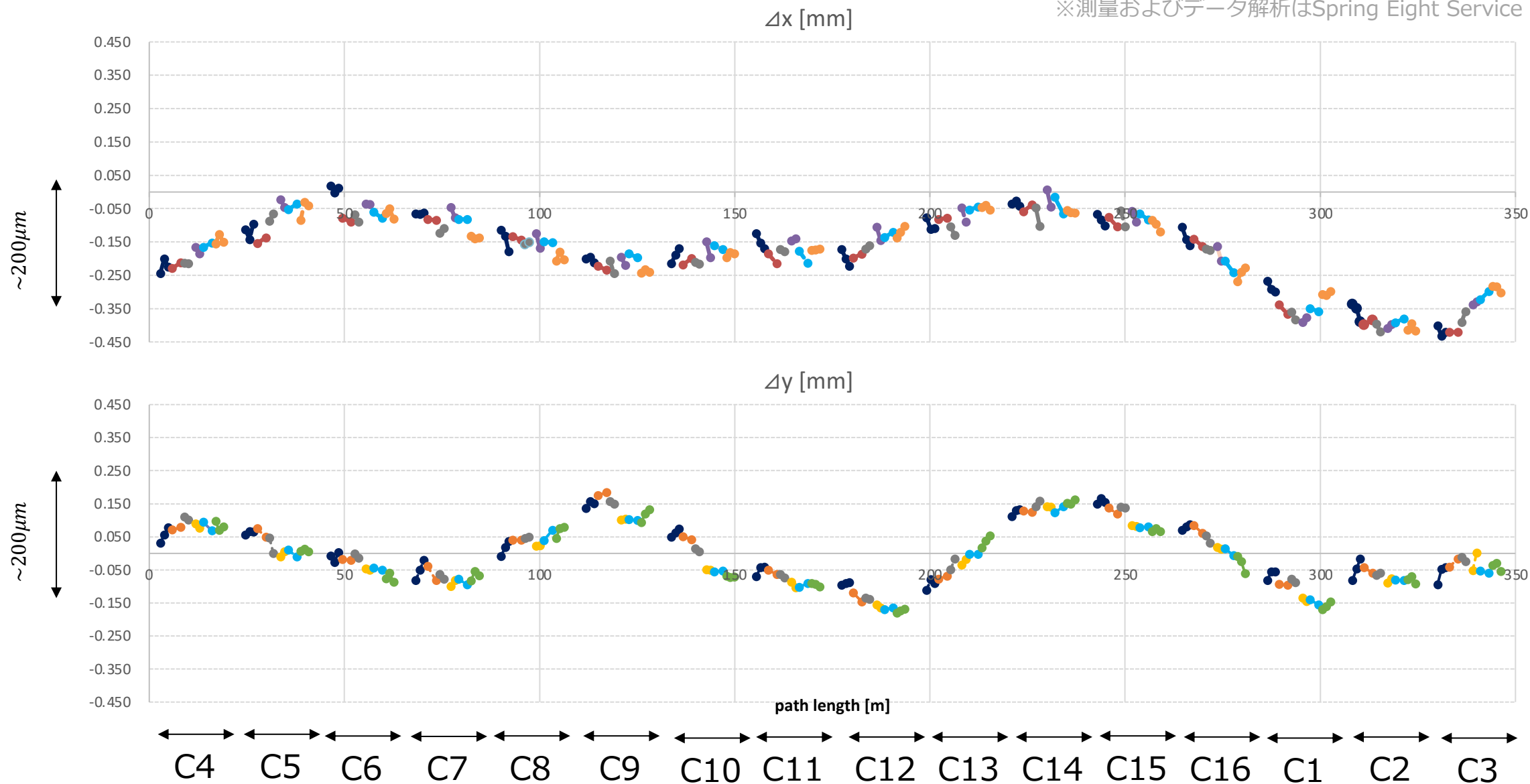
- 4-Bend-Acromat 構造
  - (偏向×4 + 四極×10 + 六極×10) × 16セル
- 架台毎にVWM[※]で磁場中心をアライメント
- レーザートラッカーを用いてトンネル内に設置



[※] K. Fukami et al "Performance verification of a precise vibrating-wire magnet alignment technique for next-generation light sources", Rev. Sci. Instrum. 90, 054703 (2019);

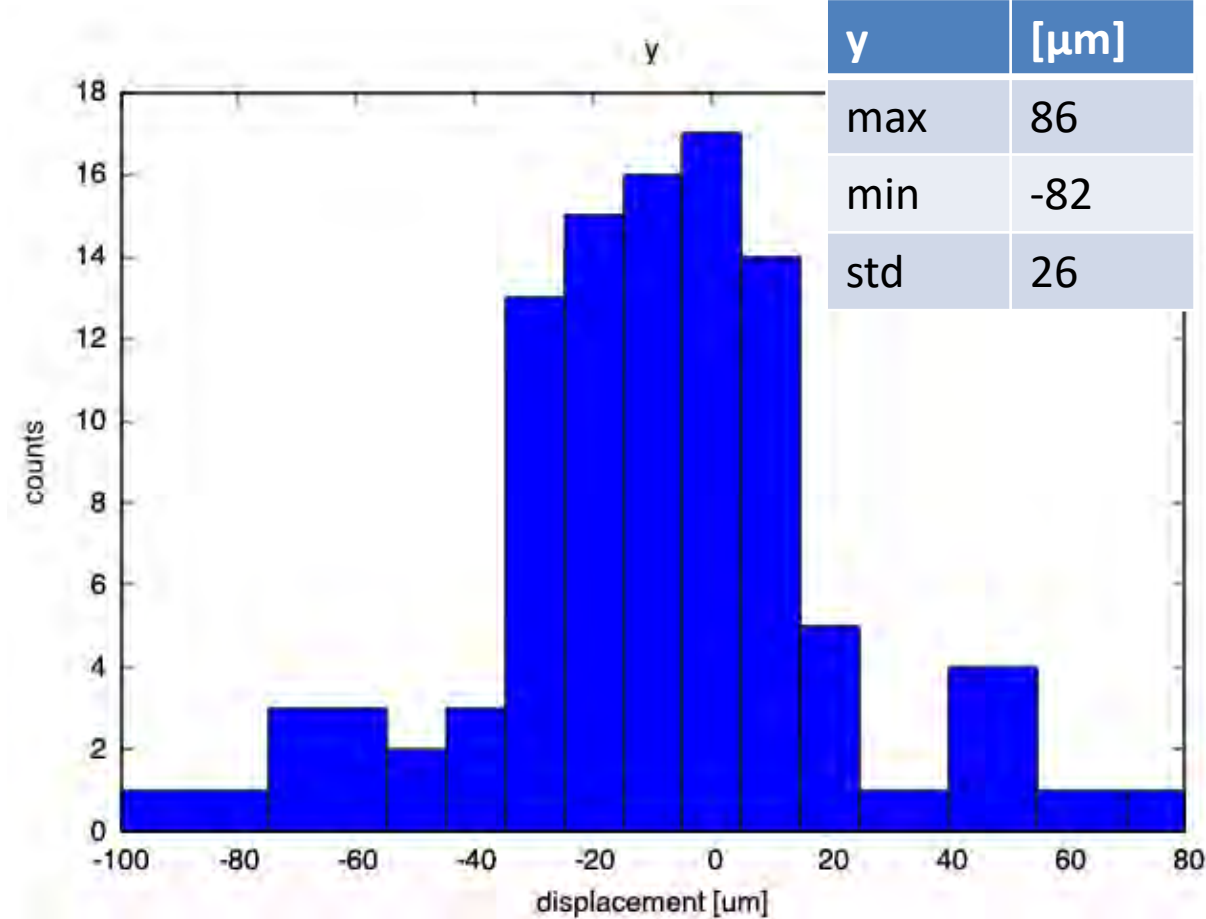
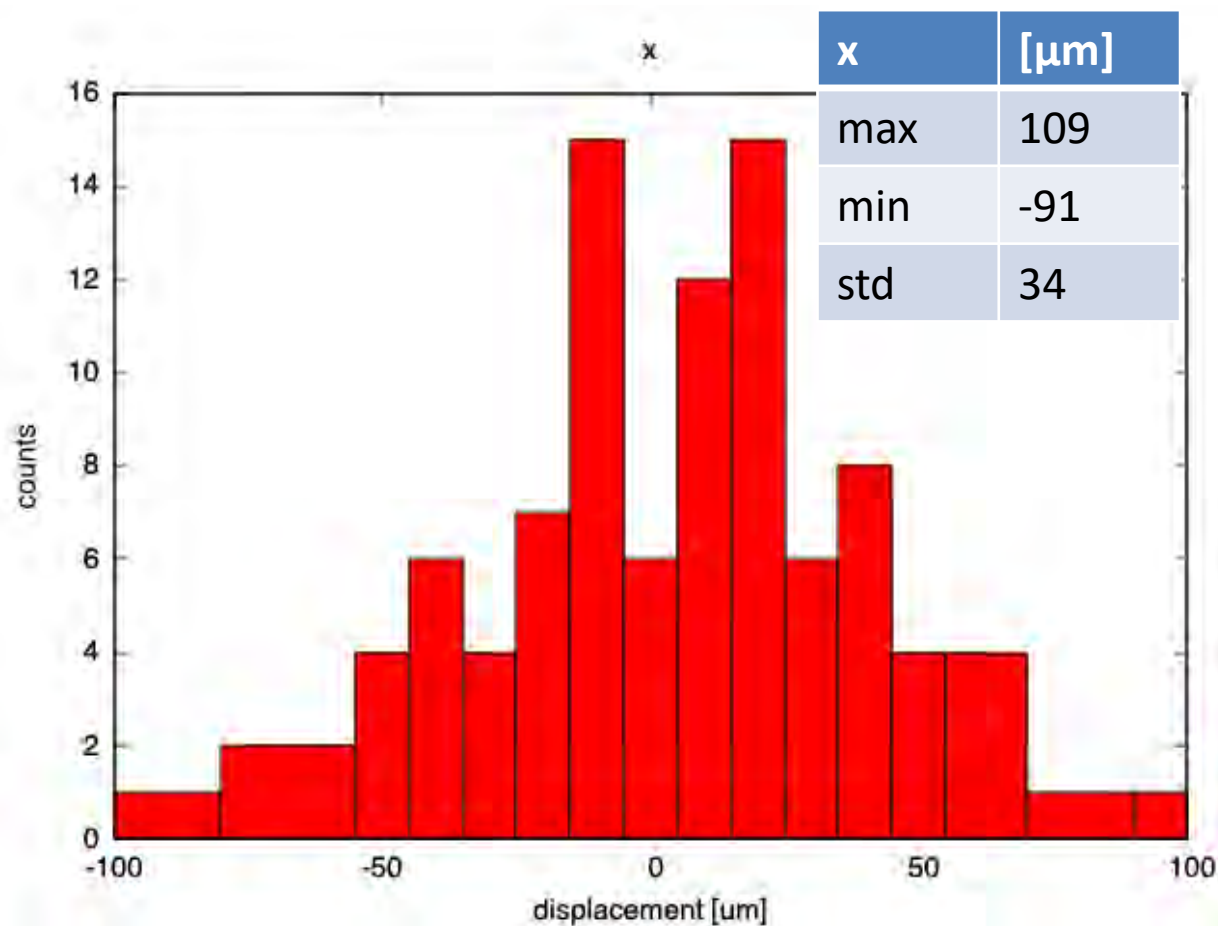


※測量およびデータ解析はSpring Eight Service (SES)による



※データは偏向磁石および各架台の上下流端の測定点

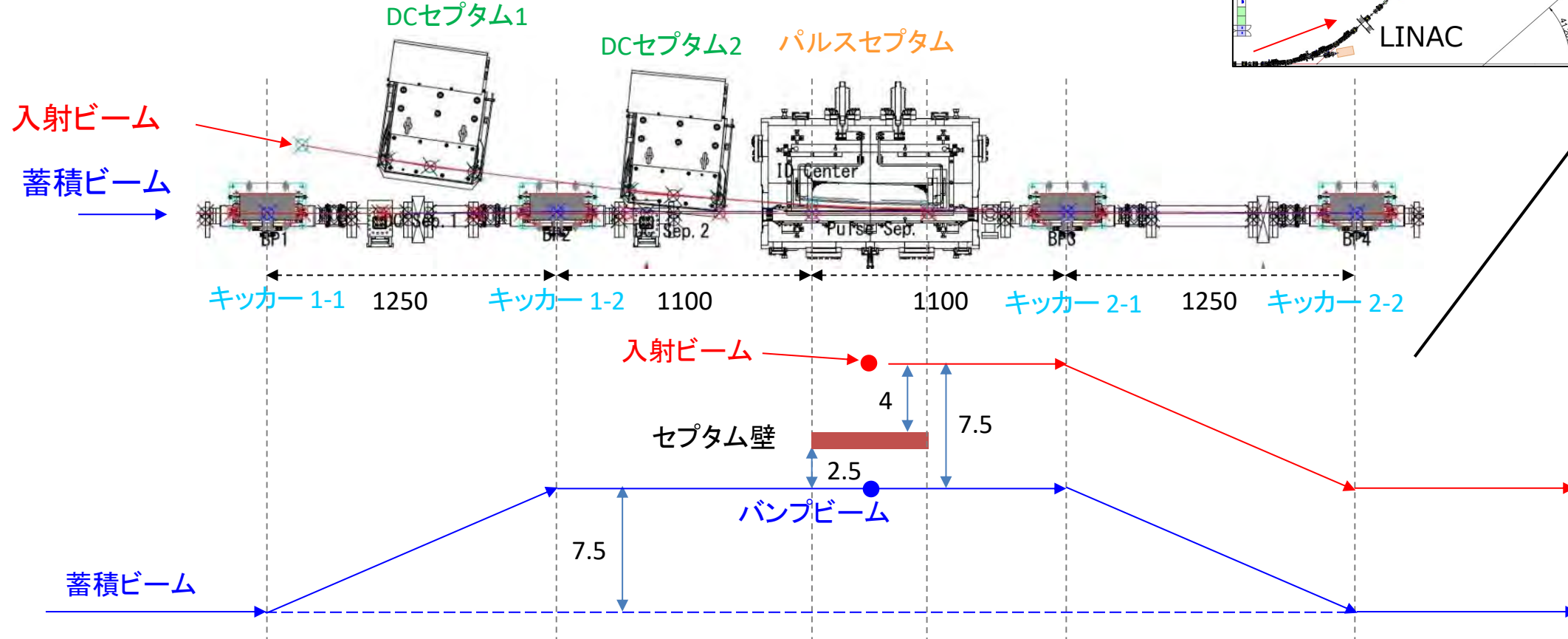
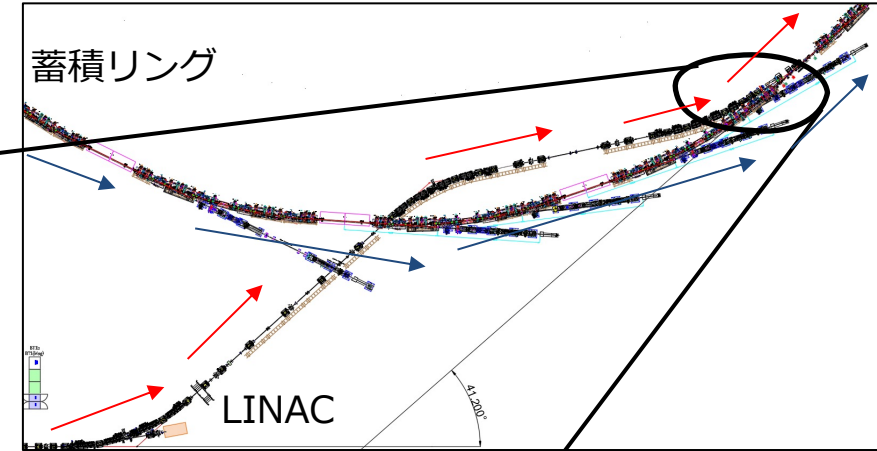
※測量およびデータ解析はSpring Eight Service (SES)による



- 架台同士は十分滑らかに接続されている
- うねりは建屋/地盤の変形による影響が見えている; ビームへの影響は小さい

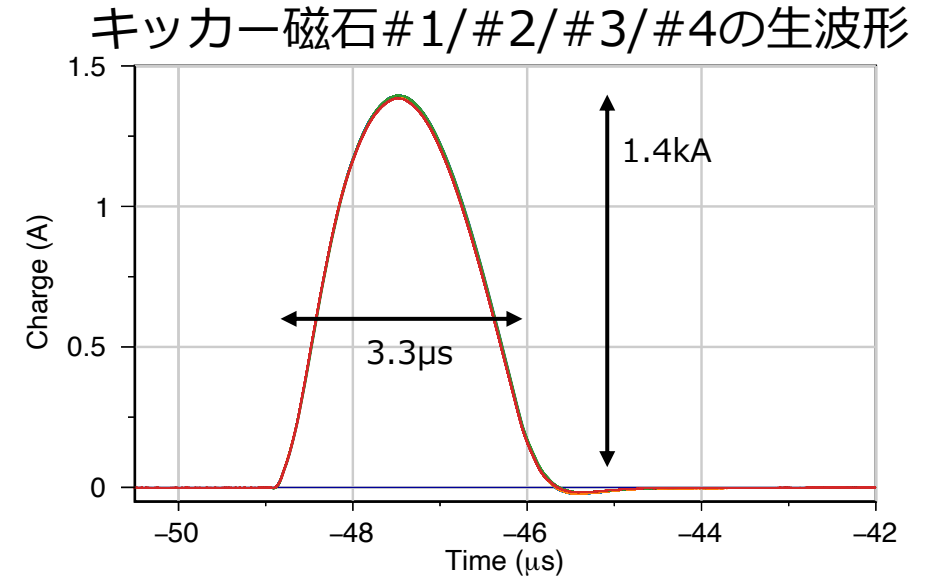
- 電源1台でキッカー2台を駆動
- 同じ角度で蹴る → 蓄積ビームを揺らさない透明入射(を目指す)

磁石	B (T)	長さ (mm)	積分磁場 (Tm)	キック角 (mrad)	パルス幅 ( $\mu$ s)
DCセプタム	1.2	400	0.48	48.0	-
パルスセプタム	1.4	500	0.7	70.0	10
キッカー	0.2	300	0.06	6.0	3

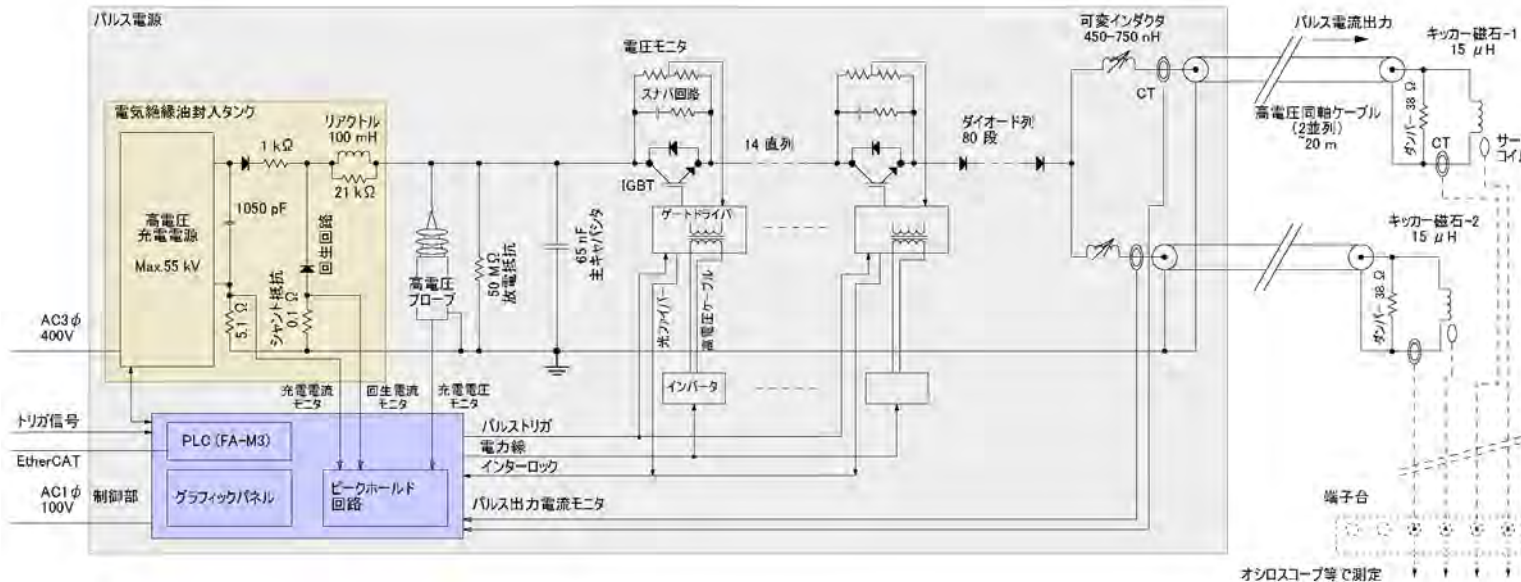
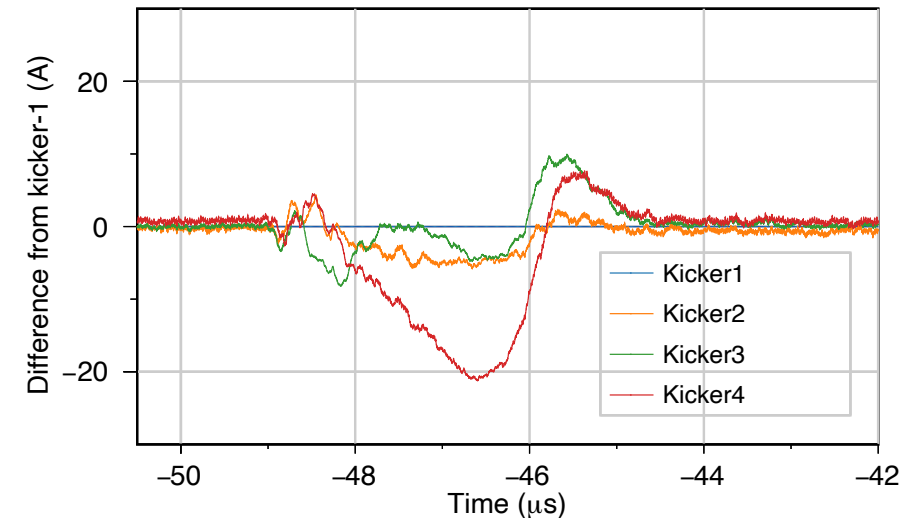




- 実際にパルス電源からキッカー磁石への通電を行い、電流波形を確認
- 定格49kV-1.4kA
  - 蓄積ビームを揺らさないために4波形をできるだけ一致させたい
  - キッカー磁石#4だけズレが大きいので電源内でインダクタンスの再微調整の余地有り
  - タイミングはトリガー発行で調整可能

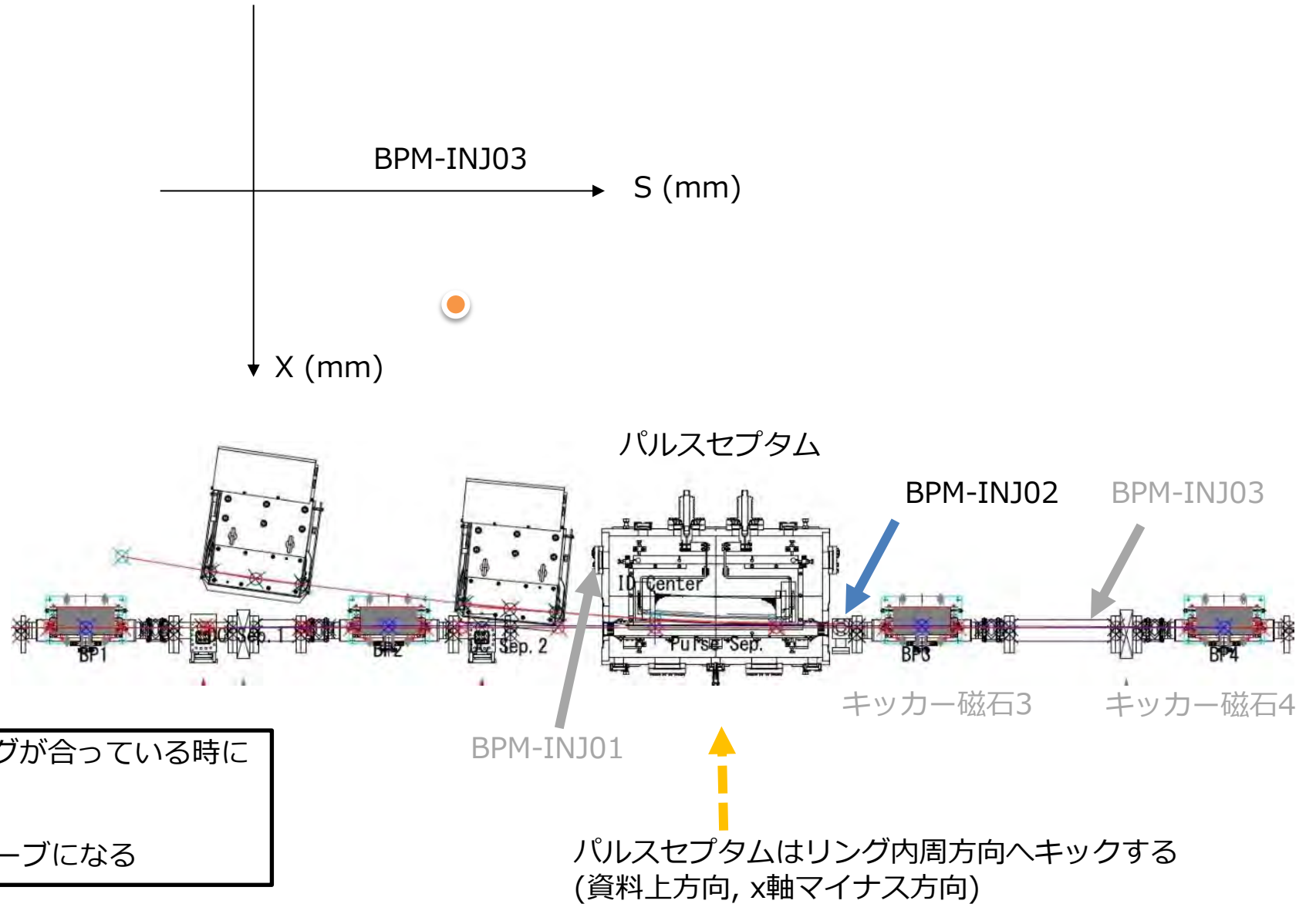
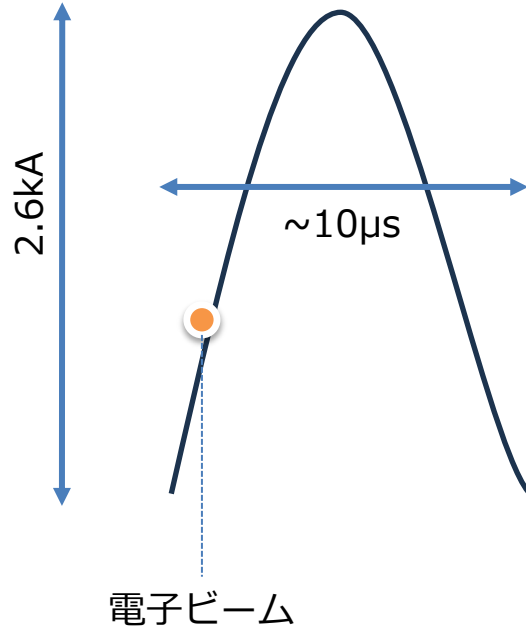


キッカー磁石#1と#2/#3/#4との差分



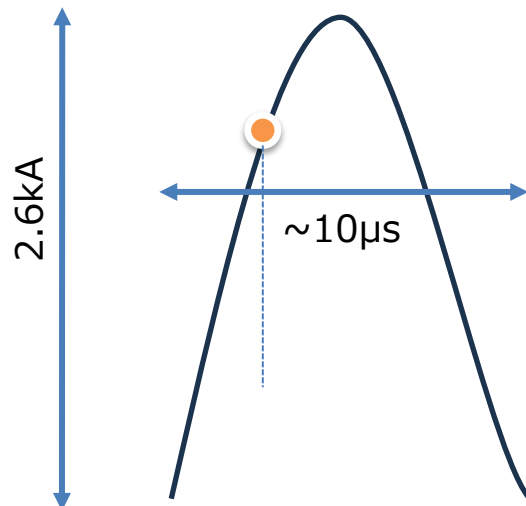
※ 波形データは2023年11月時点でのものであり、現在調整中です

## パルス電源電流波形

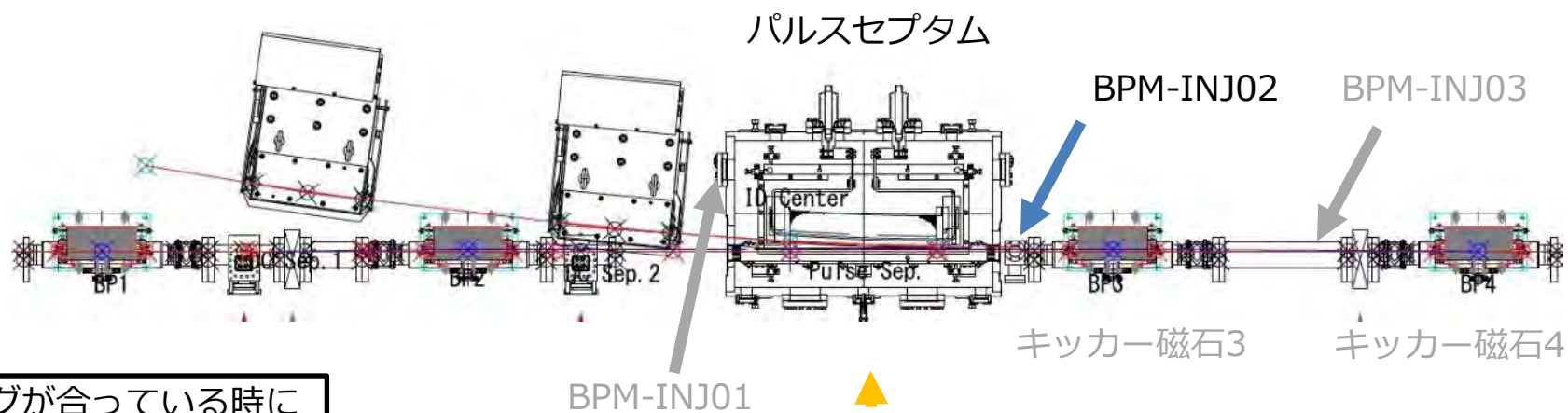
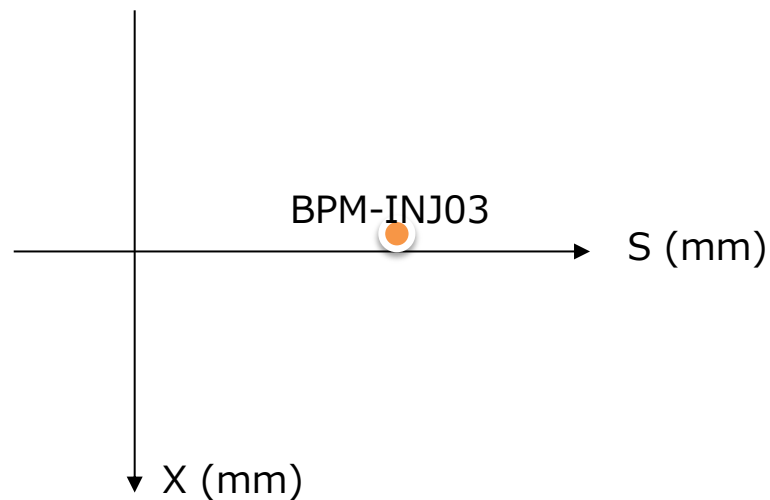


電子ビームとパルスセプタムのタイミングが合っている時に最も内周側に蹴られる。  
タイミングを変更して行った時に、BPMの位置は、電流波形と同じサインカーブになる

## パルス電源電流波形



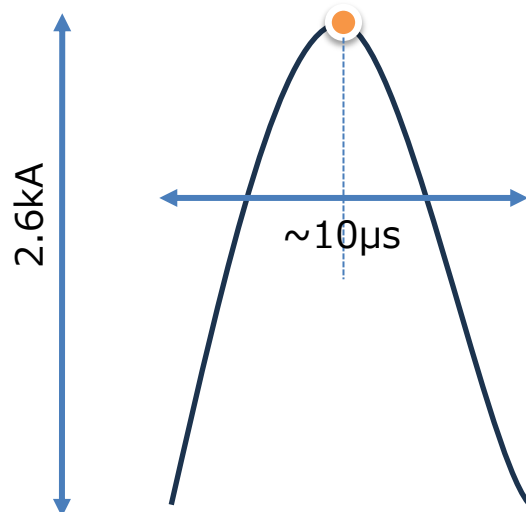
電子ビーム



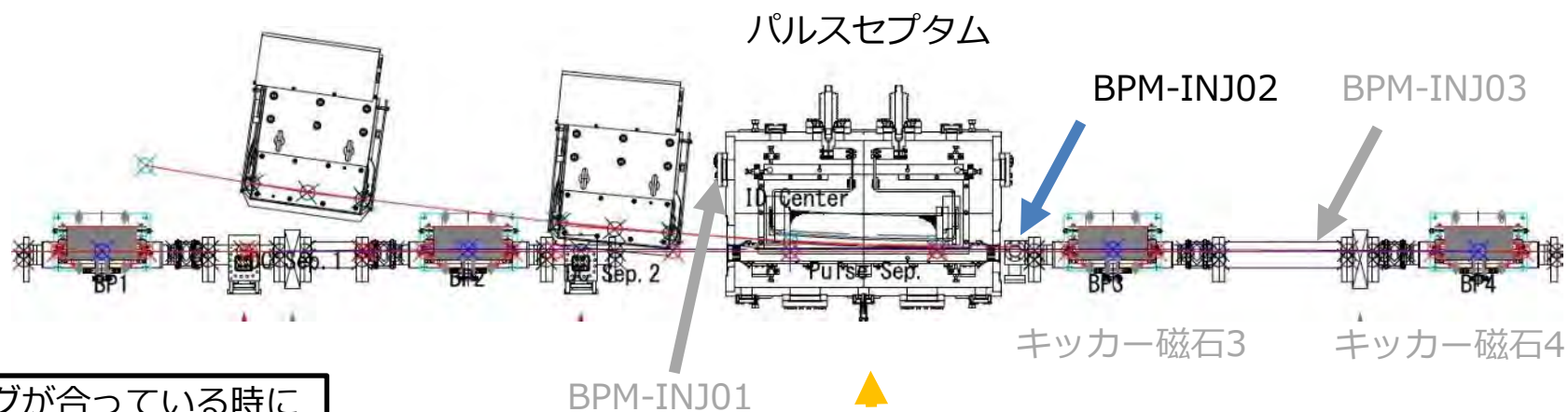
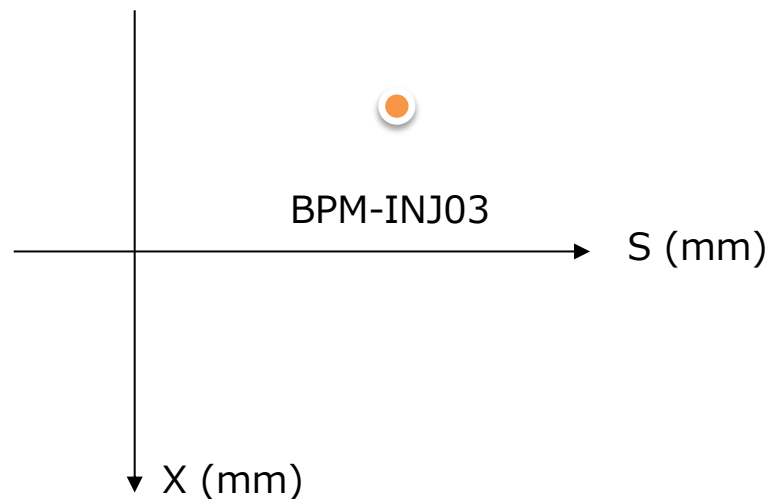
電子ビームとパルスセプタムのタイミングが合っている時に最も内周側に蹴られる。  
タイミングを変更して行った時に、BPMの位置は、電流波形と同じサインカーブになる

パルスセプタムはリング内周方向へキックする  
(資料上方向, x軸マイナス方向)

## パルス電源電流波形



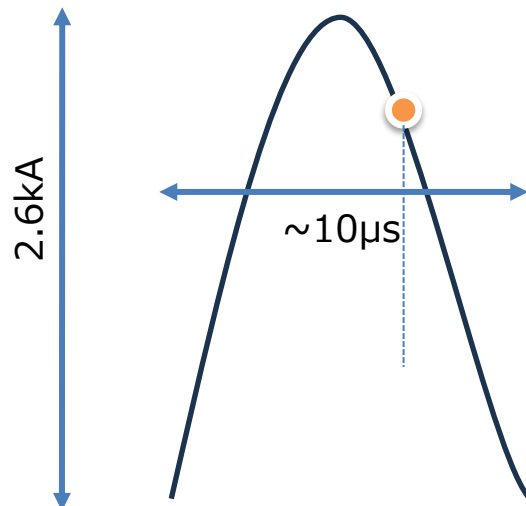
電子ビーム



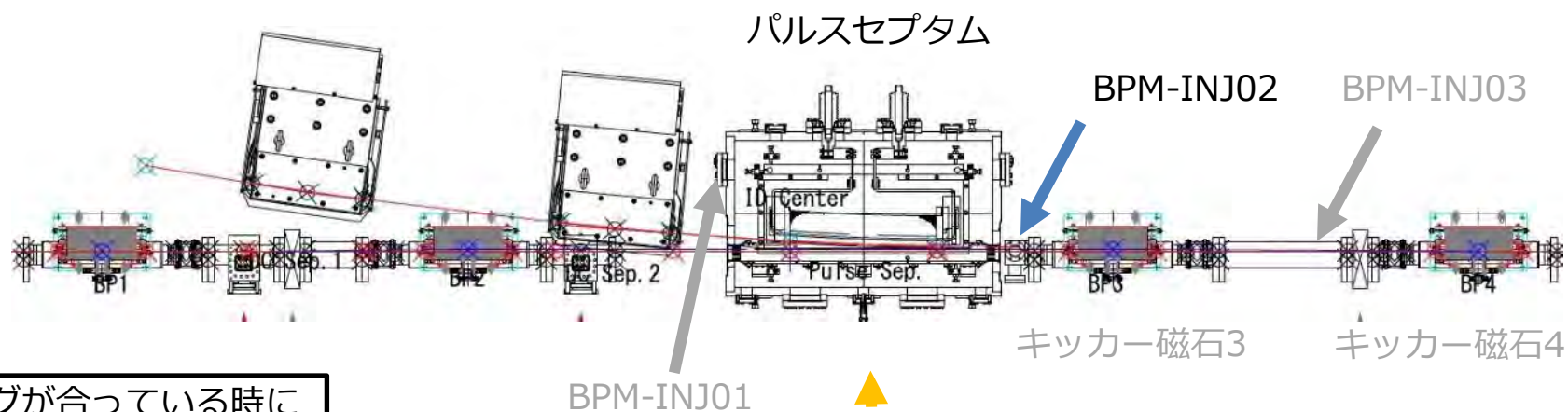
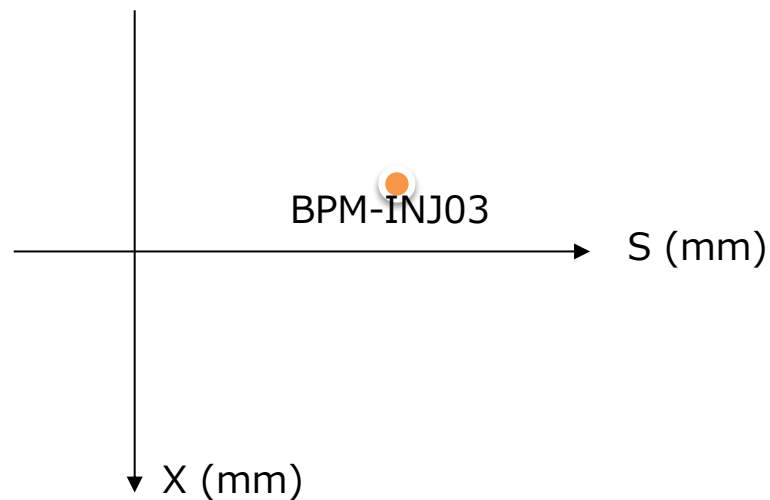
電子ビームとパルスセプタムのタイミングが合っている時に最も内周側に蹴られる。  
タイミングを変更して行った時に、BPMの位置は、電流波形と同じサインカーブになる

パルスセプタムはリング内周方向へキックする  
(資料上方向, x軸マイナス方向)

## パルス電源電流波形



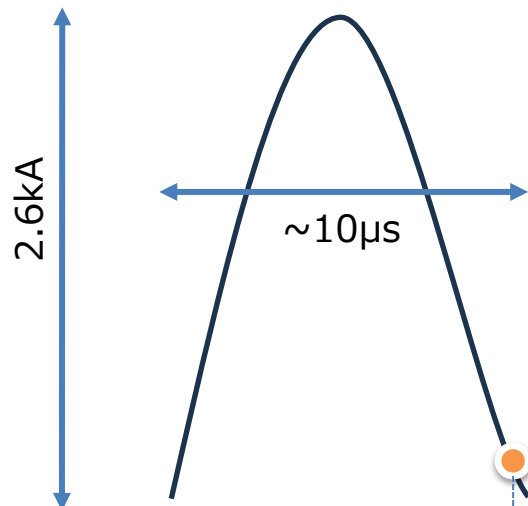
電子ビーム



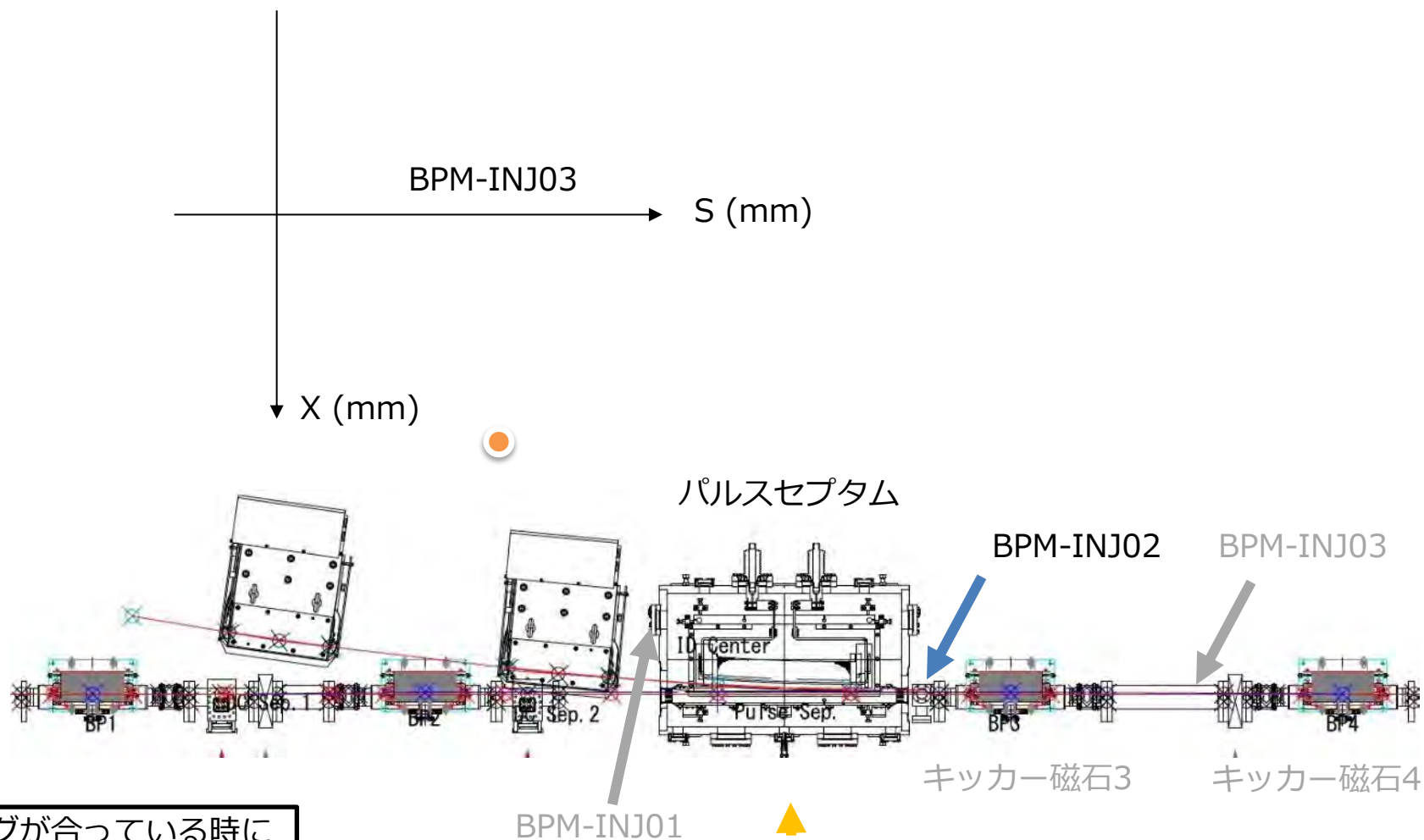
電子ビームとパルスセプタムのタイミングが合っている時に最も内周側に蹴られる。  
タイミングを変更して行った時に、BPMの位置は、電流波形と同じサインカーブになる

パルスセプタムはリング内周方向へキックする  
(資料上方向, x軸マイナス方向)

## パルス電源電流波形



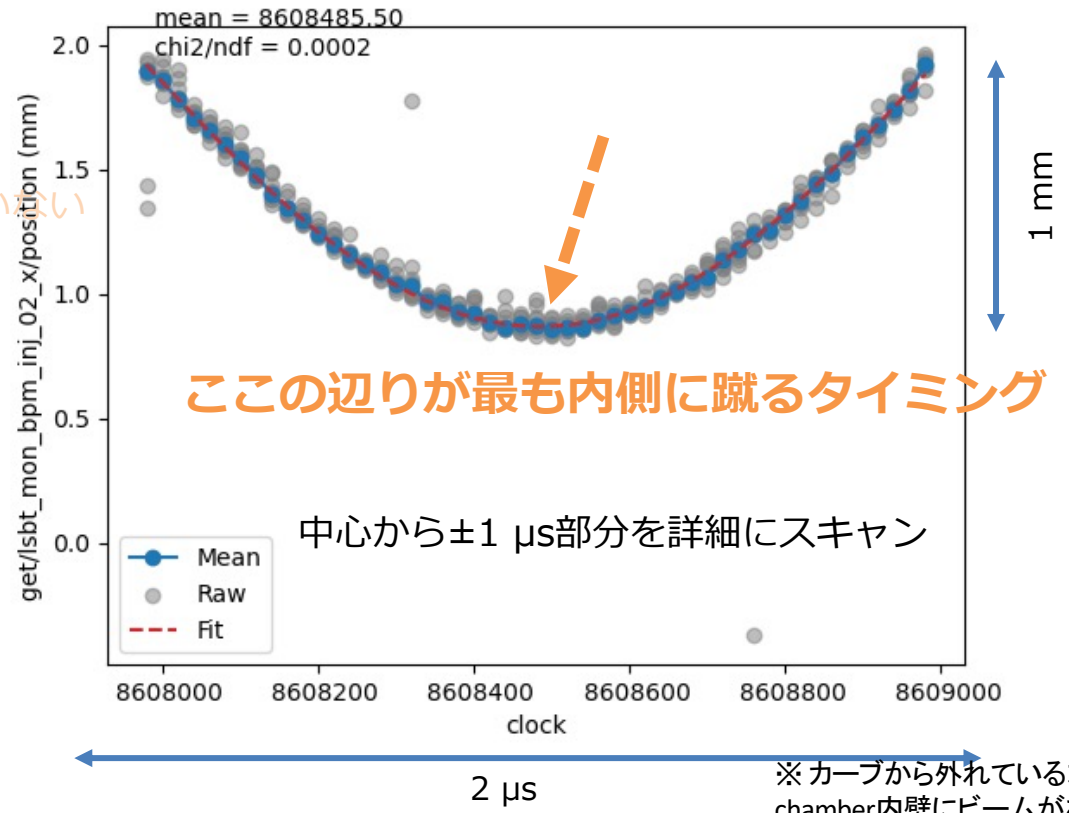
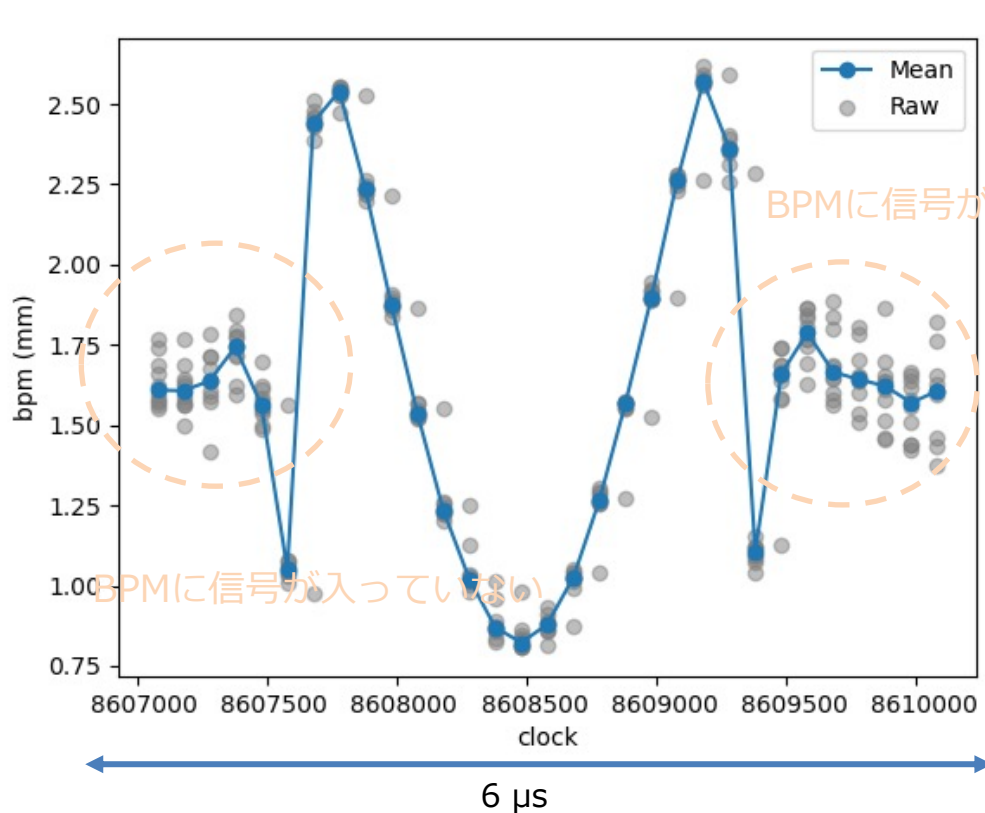
電子ビーム



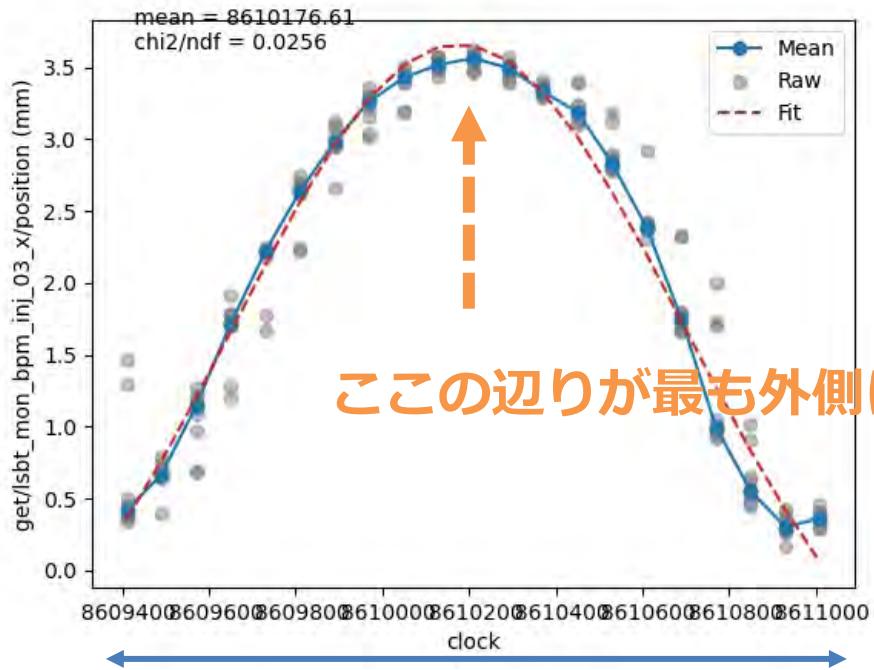
電子ビームとパルスセプタムのタイミングが合っている時に最も内周側に蹴られる。  
タイミングを変更して行った時に、BPMの位置は、電流波形と同じサインカーブになる

パルスセプタムはリング内周方向へキックする  
(資料上方向, x軸マイナス方向)

- サインカーブで中心から $\pm 1 \mu\text{s}$ 動くと $14^\circ$ 程度  $\rightarrow$  13 kV時で1 mm程度動く
- 予想と consistent な測定データが得られた
- カーブの底に位置するタイミング設定値を選んだ

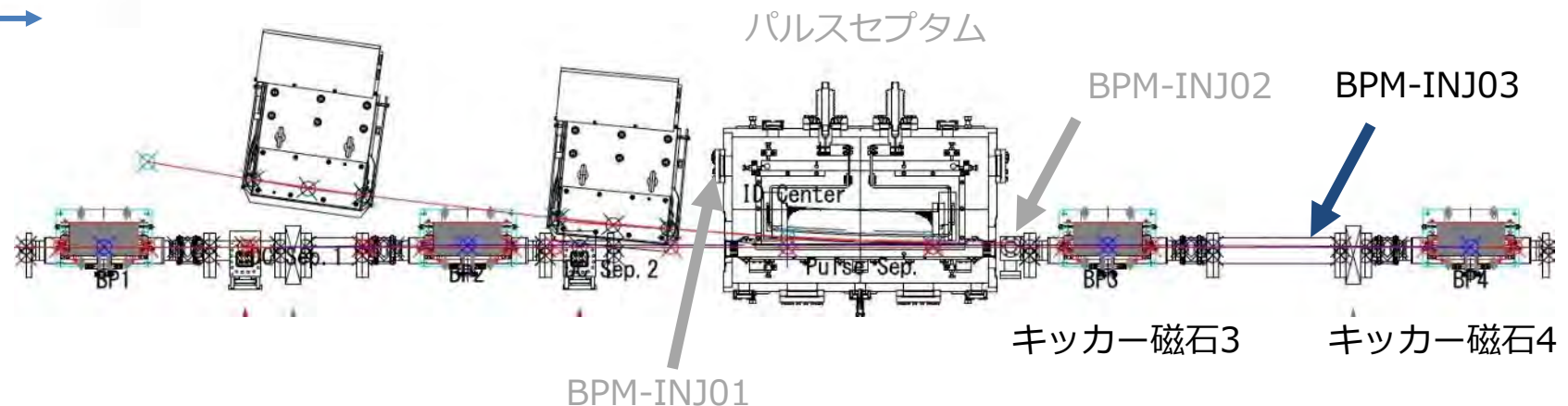


※カーブから外れている左右の箇所では、chamber内壁にビームがあたりBPM信号強度が不足しているため、正しい位置は反映していない



この辺りが最も外側に蹴るタイミング

- キッカーでつくるバンプ軌道は7.5mm height
  - ただし今回はBPM-INJ03でモニタしているので、おおよそ3.5mm heightになる
- Xがプラス方向のサインカーブ
- ほぼ電流波形を再現する形のデータが得られた





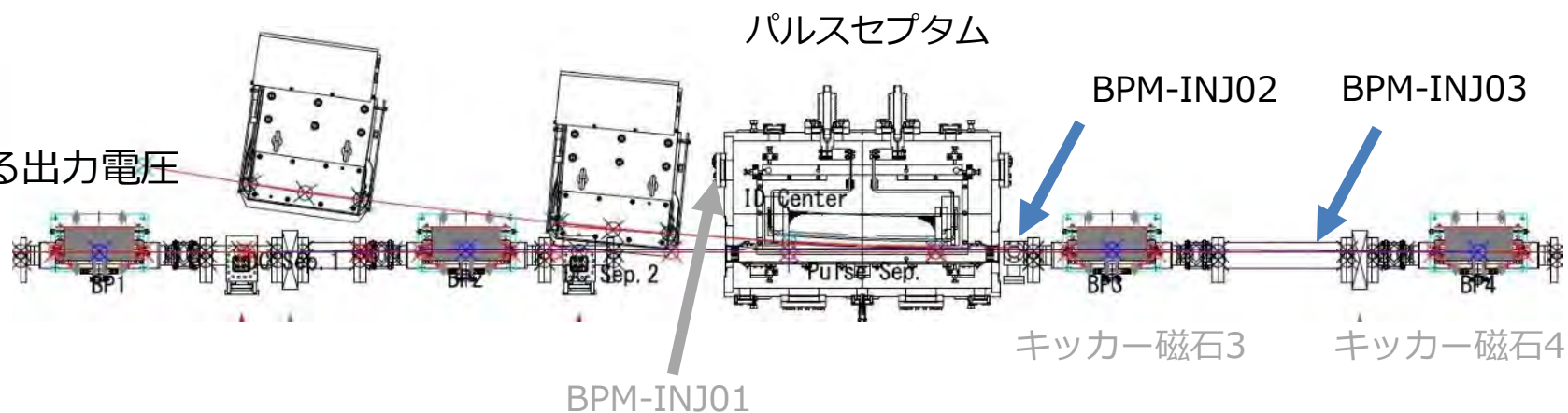
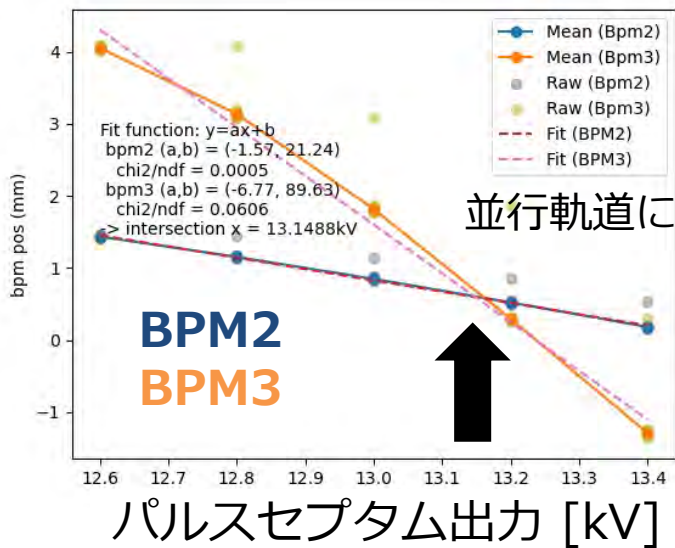
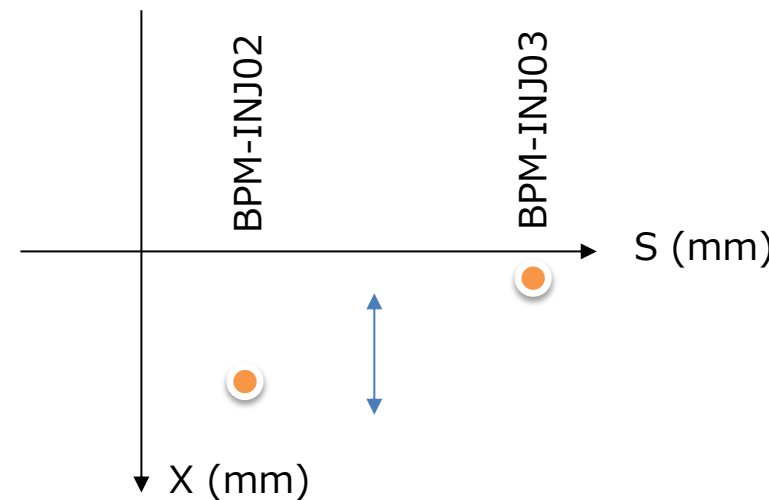
## ■ パルスセプタムの内壁ギリギリまで寄せる

- BPM1を見ながらDCセプタムを調整した

## ■ 蓄積ビームに対して、入射ビームを並行な軌道にする

- パルスセプタム直下のBPM2,3の位置が重なるように波高を調整した
- この時キッカーはOFF

※パルスセプタムが蹴りすぎの図



- 3GeV次世代放射光施設(NanoTerasu)における蓄積リングの電磁石および電源が全て設置された
  - 設置誤差は許容範囲内に収まっており、蓄積電子ビームに対する影響は十分小さい
- 2023年5月から全ての電源が通電状態にあり、現在まで問題なく稼働している
- 入射部パルス電源のタイミング調整を行い、電子ビームの磁石への到達タイミングと出カタイミングを調整した
- 入射部のパルス波形の微調整は今後蓄積ビームの揺れを見ながら行う

# ご清聴ありがとうございました

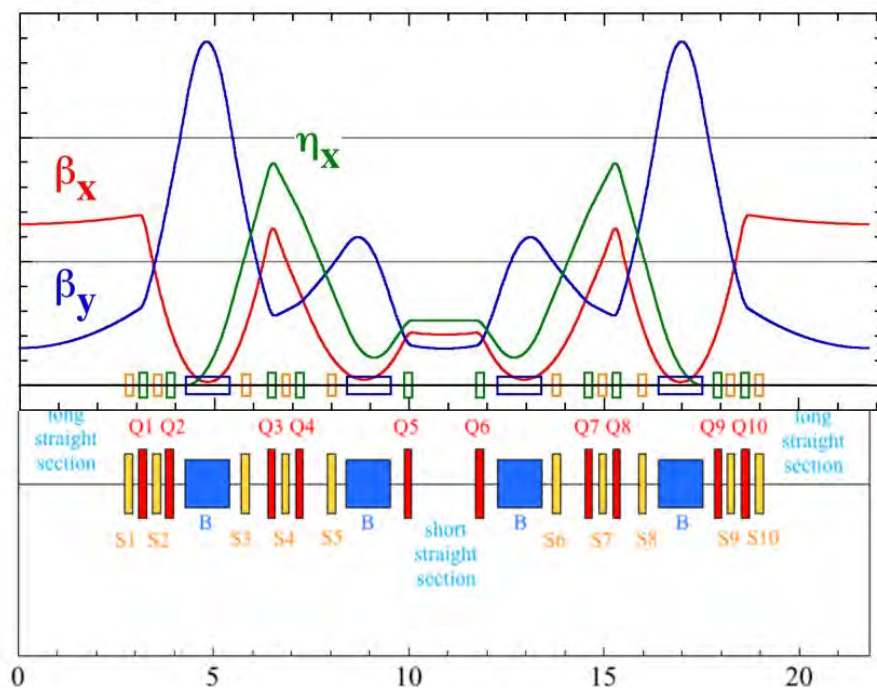


量子科学技術研究開発機構(QST)は、量子科学技術による「調和ある多様性の創造」により、平和で心豊かな人類社会の発展への貢献を理念とし、「世界トップクラスの量子科学技術研究開発プラットフォーム」の構築を志します。

- QSTホームページ : <http://www.qst.go.jp/>
- QST未来戦略2016: <http://www.qst.go.jp/about/welcome/plan2016.html>

偏向電磁石のパラメータ	B1
ビーム軌道上のギャップ (mm)	28
定格電流 (A)	650
ターン数 (T/Pole)	16
有効磁場長 (mm)	1130
コイルを含む全長 (mm)	≦1315
員数	64
二極磁場強度 (T)	0.8688
四極磁場強度 (T/m)	-7.06

四極電磁石のパラメータ	Q1	Q2	Q3	Q4	Q5
ボア直径 (mm)	34				
コイル定格電流 (A)	352				
コイルターン数 (T/Pole)	17	12	20	20	20
有効磁場長 (mm)	200				
コイルを含む全長 (mm)	≦248	≦230	≦248	≦248	≦266
磁場勾配均一度 (%) ( $x < \pm 6\text{mm}$ )	≦±0.1				
員数	32	32	32	32	32
磁場強度 (T/m)	+32.62	-2.62	+49.15	+5.43	+44.64

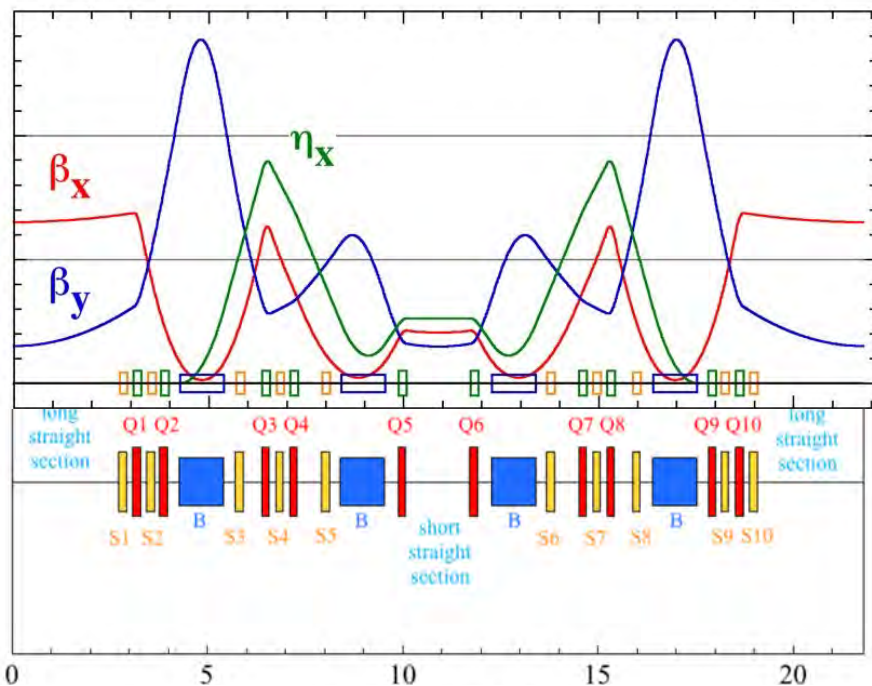


六極電磁石のパラメータ	S1	S2	S3	S4	S5
ボア直径 (mm)	40				
メインコイル定格電流 (A)	250				
メインコイルターン数 (T/Pole)	9	9	9	5	9
有効磁場長 (mm)	200				
コイルを含む全長 (mm)	≦259	≦259	≦259	≦309	≦259
磁場勾配均一度 (%) ( $x < \pm 6\text{mm}$ )	≦±0.1				
補助コイル定格電流 (A)	20				
補助コイルターン数(T/Pole)	48	48	48	20	48
員数	32	32	32	32	32
磁場強度 (T/m <sup>2</sup> )	+949.5	-1124.9	-472.3	+1061.7	-1540.7

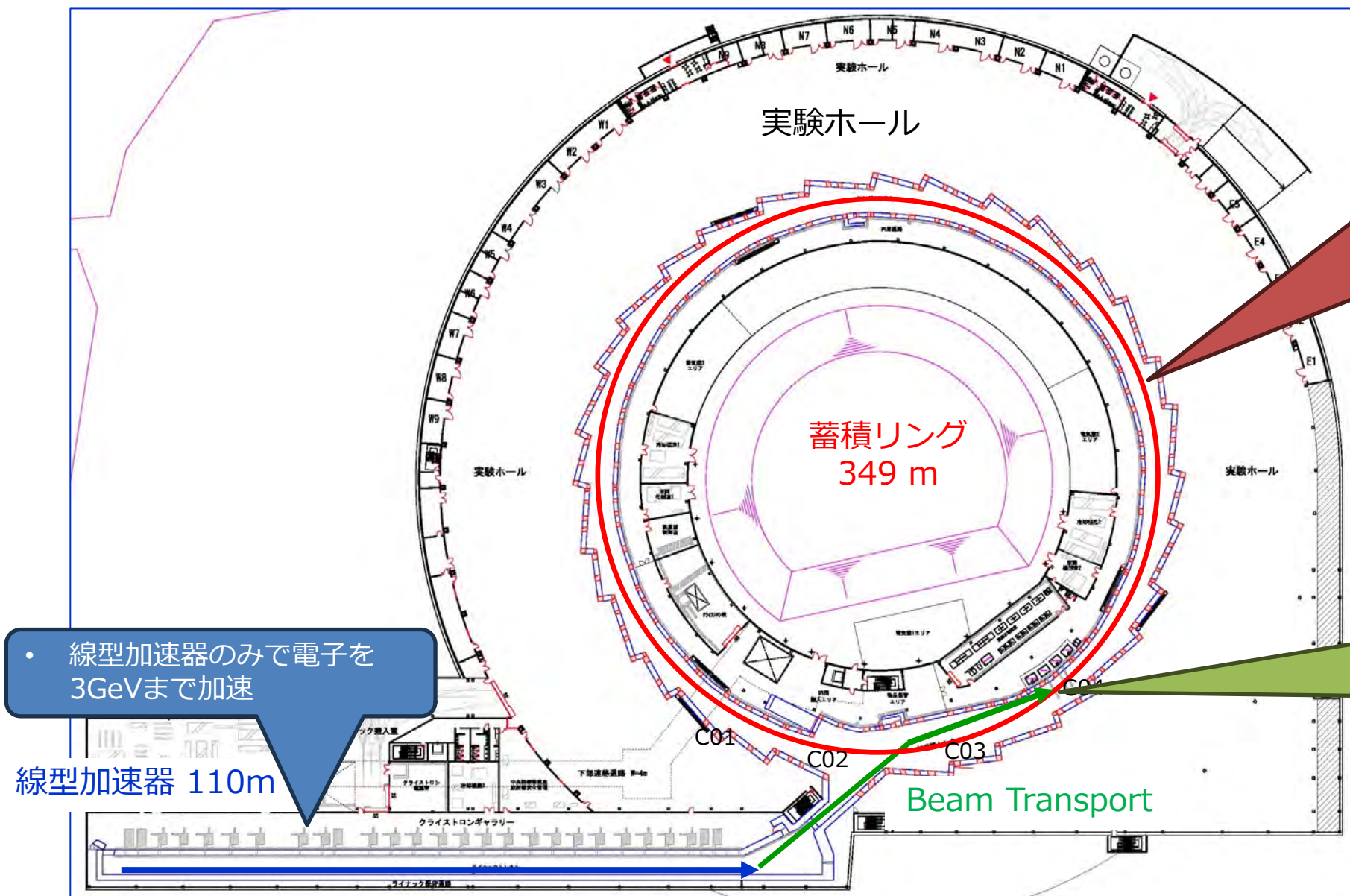
[※] 3GeV次世代放射光施設加速器デザインレポートより

偏向電磁石のパラメータ	B1
ビーム軌道上のギャップ (mm)	28
定格電流 (A) / 電圧 (V)	621 / 5
ターン数 (T/Pole)	16
磁極長 (mm)	1091
員数	64
冷却水流量 (L/min)	11.2
重量 (kg)	1380
曲率半径 (mm)	11410.085
偏向角 (°)	5.625

四極電磁石のパラメータ	Q1	Q2	Q3	Q4	Q5
ボア直径 (mm)	34				
積分磁場勾配 (T)	8.9	6.3	10.5	10.5	
磁極長 (mm)	181				
コイル定格電流 (A) / 電圧 (V)	352 / 3.4				
コイルターン数 (T/Pole)	17	12	20	20	
コイルを含む全長 (mm)	247	229	247	265	
員数	32	32	32	32	
冷却水流量 (L/min)	5.9	7.6	5.4	5.1	
重量 (kg)	320	315	400	325	



六極電磁石のパラメータ	S1	S2	S3	S4	S5
ボア直径 (mm)	40				
積分磁場勾配 (T/m)	434	434	434	241	434
メインコイル定格電流 (A) / 電圧 (V)	260 / 1.9				
メインコイルターン数 (T/Pole)	9	9	9	5	9
磁極長 (mm)	188				
コイルを含む全長 (mm)	258	258	258	289	258
員数	32	32	32	32	32
冷却水流量 (L/min)	2.5	2.5	2.5	3.5	2.5
重量 (kg)	300	300	300	205	300



• 線型加速器のみで電子を3GeVまで加速

線型加速器 110m

- 4-Bend-Acromat 構造
- 1セルあたり
  - 偏向磁石×4
  - 四極磁石×10
  - 六極磁石×10
- が16セル並ぶ
- それぞれ直列接続されていて、リング一周を同時に制御
- 補助コイルは独立制御

- 入射部では蓄積ビームに対して7.5mmバンプをつくる
- 1台のパルス電源で2台のキッカー磁石を駆動
- 2台の電源(4台の磁石)を精密一致させ、透明入射を目指す

表 1.1 蓄積リングの主要パラメータ

電子ビームエネルギー	$E$	2.998 GeV
ラティス構造		4-Bend Achromat
周長	$C$	348.843 m
セル数 (偏向磁石数)	$N_{\text{cell}}$	16 (64)
長直線部	$LSS$	5.44 m $\times$ 16
短直線部	$SSS$	1.64 m $\times$ 16
ベータatronチューン	$(\nu_x, \nu_y)$	(28.17, 9.23)
自然クロマティシティ	$(\xi_x, \xi_y)$	(-60.50, -40.99)
自然水平エミッタンス	$\epsilon_x$	1.14 nmrad
運動量収縮因子	$\alpha_0$	0.00043
自然エネルギー広がり	$\sigma_E/E$	0.0843%
長直線部中央のラティス関数	$(\beta_x, \beta_y, \eta_x)$	(13.0, 3.0, 0.0) m
短直線部中央のラティス関数	$(\beta_x, \beta_y, \eta_x)$	(4.1, 3.0, 0.05) m
減衰分配数	$(J_x, J_y, J_e)$	(1.389, 1.0, 1.611)
減衰時間	$(\tau_x, \tau_y, \tau_e)$	(8.1, 11.2, 7.0) ms
偏向磁石でのエネルギー損失	$U_0$	0.621 MeV/turn
高周波加速周波数	$f_{\text{RF}}$	508.759 MHz
高周波加速電圧	$V_{\text{RF}}$	3.6 MV
ハーモニック数	$h$	592
自然バンチ長	$\sigma_b$	2.92 mm (9.74 ps)

## ■ Family電源

- 偏向磁石は全て直列接続;
  - 650A/400V電源 1台
- 四極磁石は同じ種別毎に直列接続;
  - 350A/200V電源×3台 (Q1,3,5)
  - 50A/50V電源×2台 (Q2,4)
- 六極磁石は同じ種別毎に直列接続;
  - 250A/110V電源×5台

## ■ Q補助電源

- Q1, 3, 6, 8, 10のみ補助電源(±20A/±10V)を接続

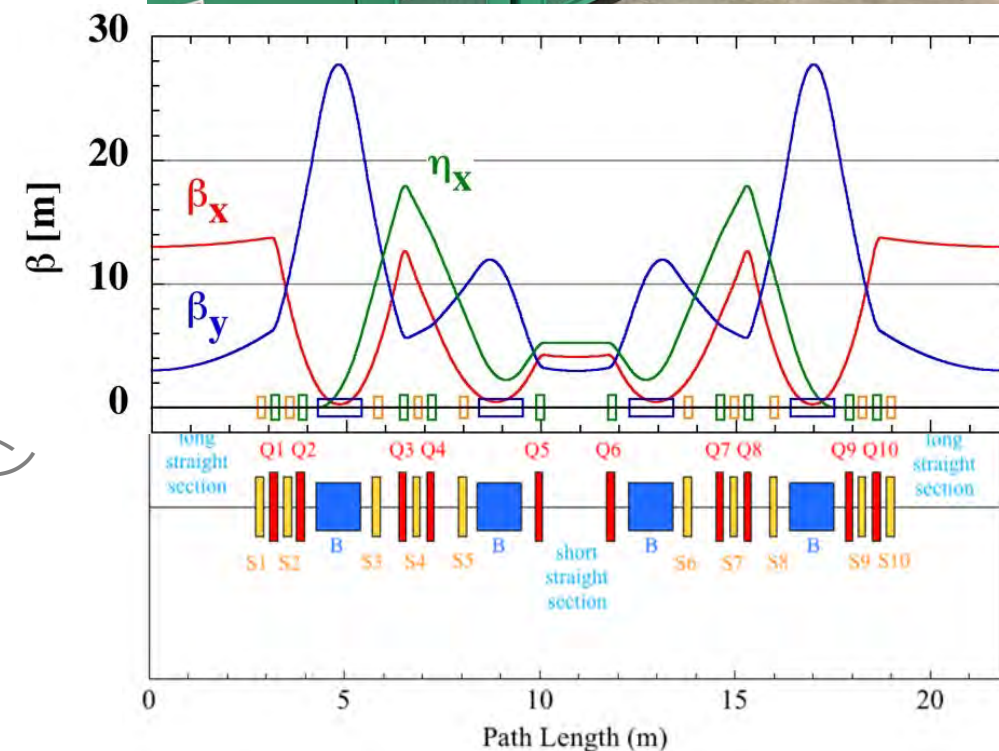
## ■ S補助コイル電源 (ステアリング磁石として使用)

- S1,3,5,6,8,10のみ補助コイルを巻いてある
- ポールそれぞれに個別電源(±16A/±8V)を接続
- 六極の補助コイル出力組み合わせて水平/垂直のステアリング磁石として使用

※ 短直線部上下流端には単独STR磁石があり、それぞれ±16A/±8V電源が接続

※ 1セルあたり1台のSKEW四極磁石があり、それぞれ±20A/±10V電源が接続

※ 本電磁石電源開発についての詳細はTHOB14(8/31 17:10~)で講演されます





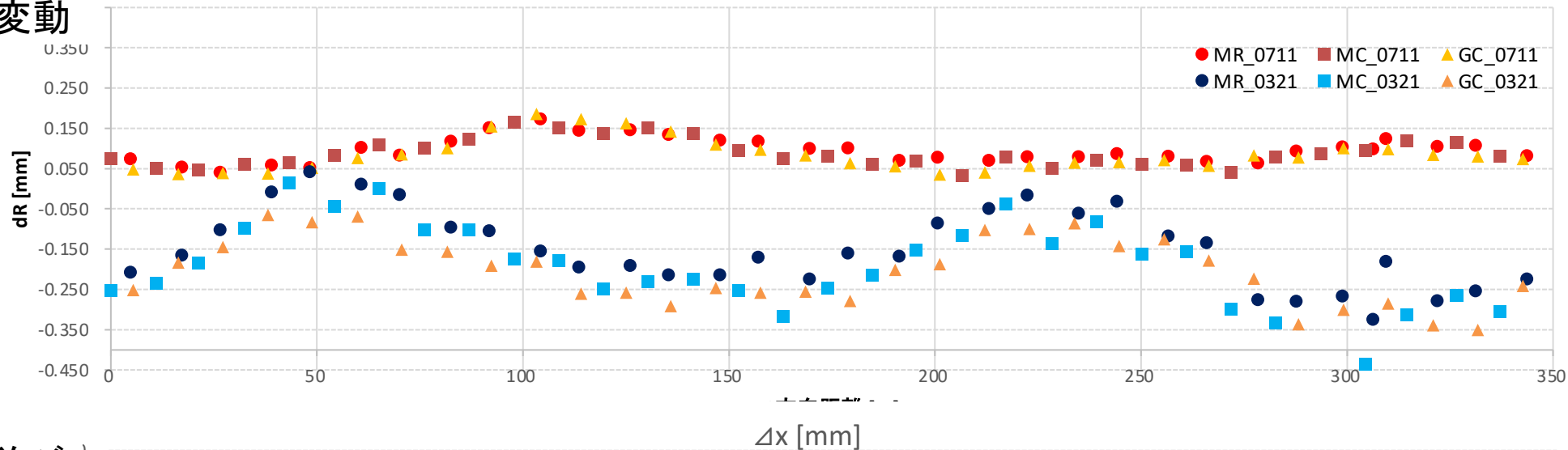
# 7. 基準点の変動 (内外周方向)

2022年5月に取得した基準点のデータ(据付時に使用)を基準とし、2022年7月(暖色系)と2023年3月の最終測量(寒色系)に取得した基準点の変動の内外周方向を以下に示す。

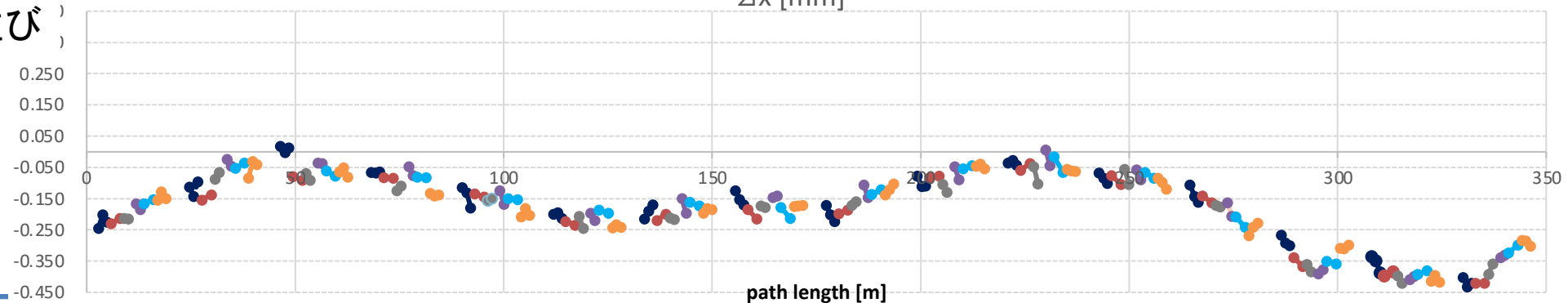
- 概ね基準点の変動量(寒色系)とfiducialの並びは合っている。
- 夏には基準点が外周側に、冬には内周側に変動しているように見える。

MRは外周壁に取り付けた基準点  
 MCは内周壁に取り付けた基準点  
 GCは床基準点

基準点の変動



Fiducialの並び

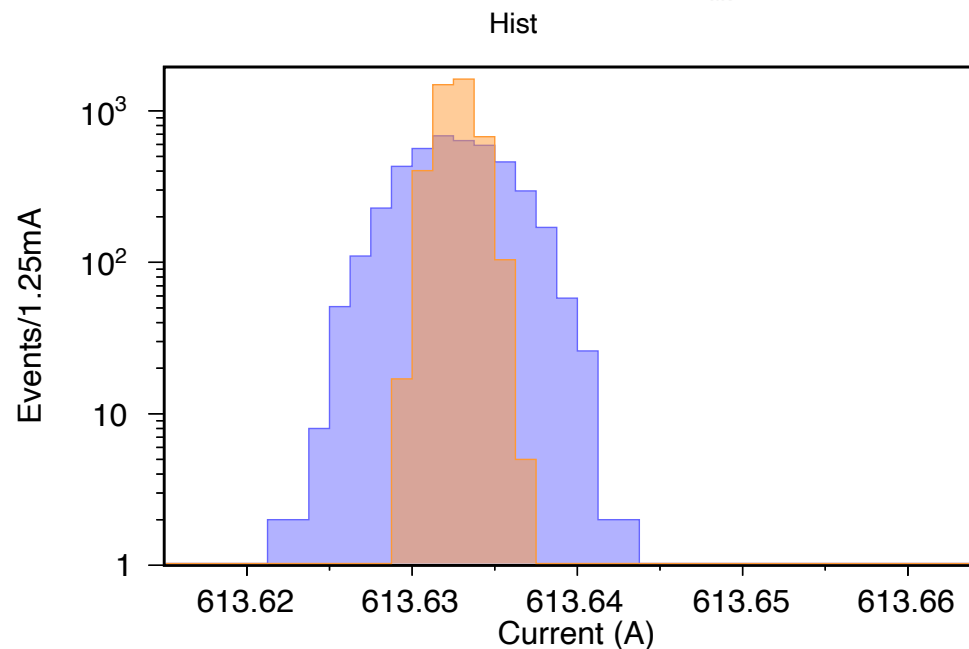
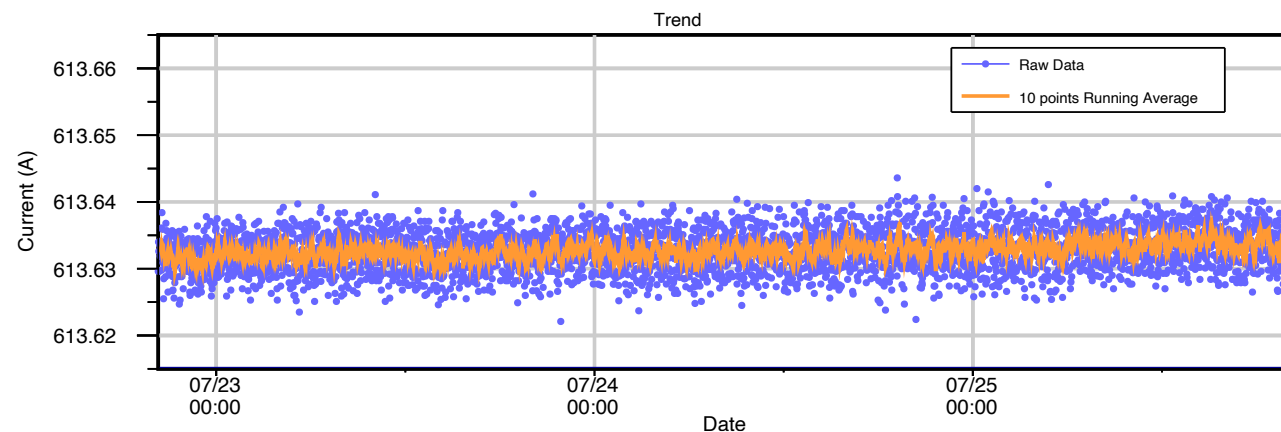
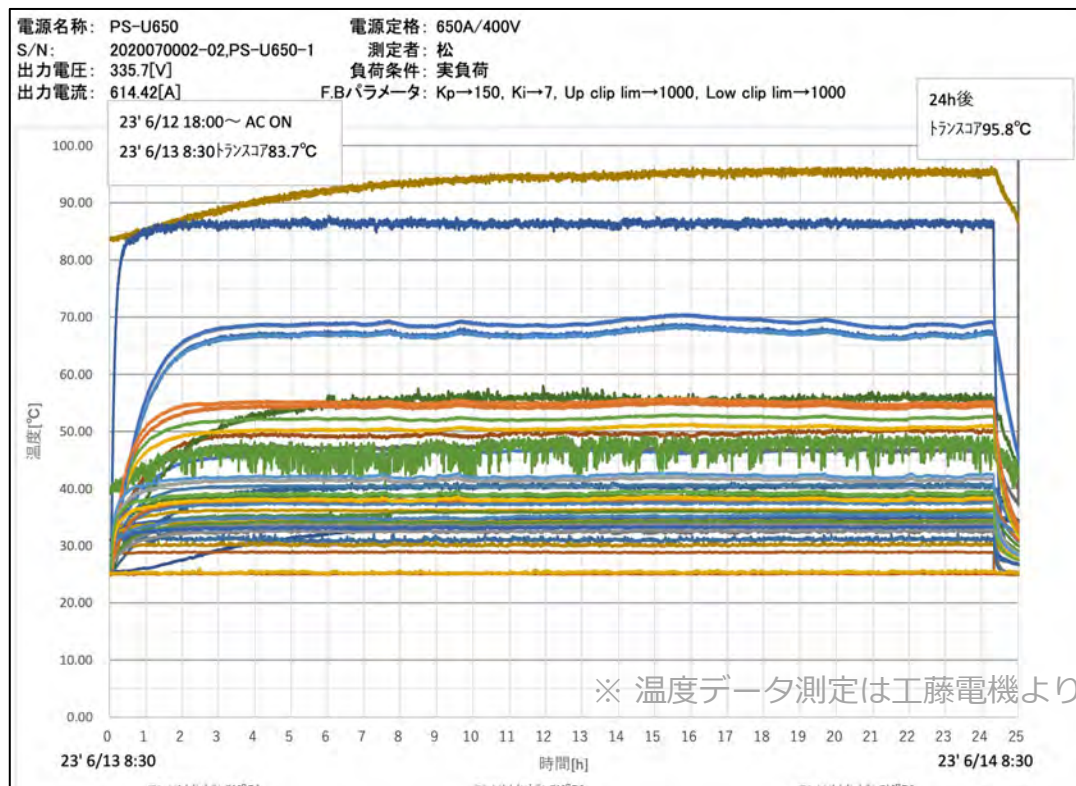


## ■ 偏向電磁石用U650電源

- トランスコア温度が24時間経過後 96degC
- 電流値は十分安定

## ■ その他電源

- 補助電源/メイン電源間でのカップルがあり、P/Iパラメータでリップルを調整済み



## ■ 【課題】 制御の同時性

- 蓄積電子ビームを補正する際に、リング一周分の電源を一斉に動かしたい
- 偏向/四極/六極磁石
  - メインコイル用電源がそれぞれ直列接続されているので同時に反映される
- 四極補助コイル/ステアリング
  - それぞれ別個の電源が接続されているので、制御命令を送った順に反映されてしまう

## ■ 【対策】 Strobeコマンドを同じにする

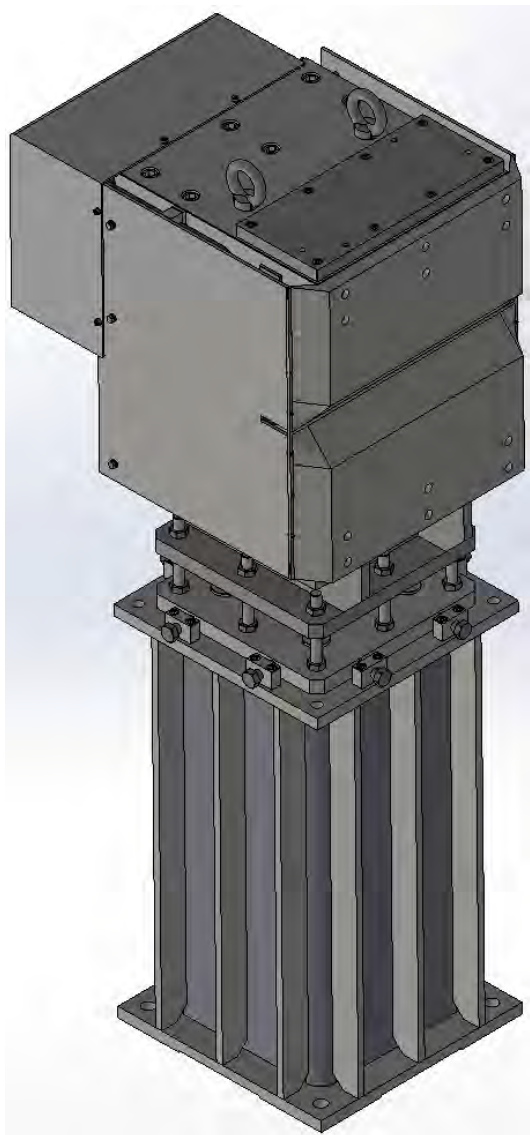
- NanoTerasuではSP8と同様にMQTTを用いたSVOC形式での制御系を用いている[\*1]
- 小型電源用のStrobeコマンドを同じにすることで各電源の同時性を実現
- <20ms[\*2]での同時性を確認できた

### 異なる制御ホスト間での電流出力変更状態を確認



[\*1] T.Sugimoto, et al. "STATUS OF THE CONTROL SYSTEM FOR FULLY INTEGRATED SACLA/SPRING-8 ACCELERATOR COMPLEX AND NEW 3GeV LIGHT SOURCE BEING CONSTRUCTED AT TOHOKU, JAPAN." *Proc. IPAC'18*, 2018.

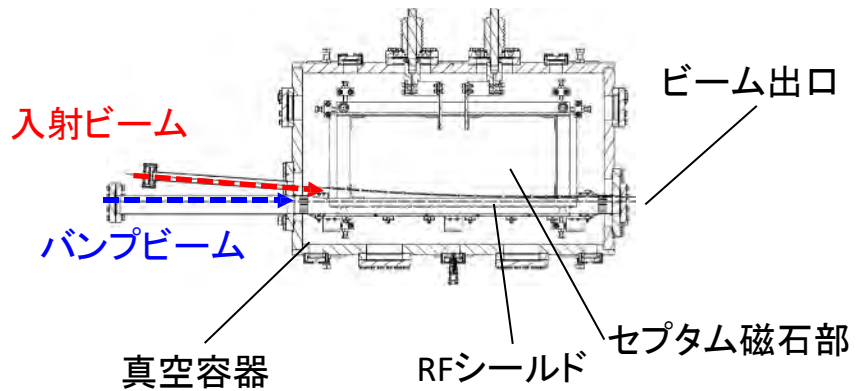
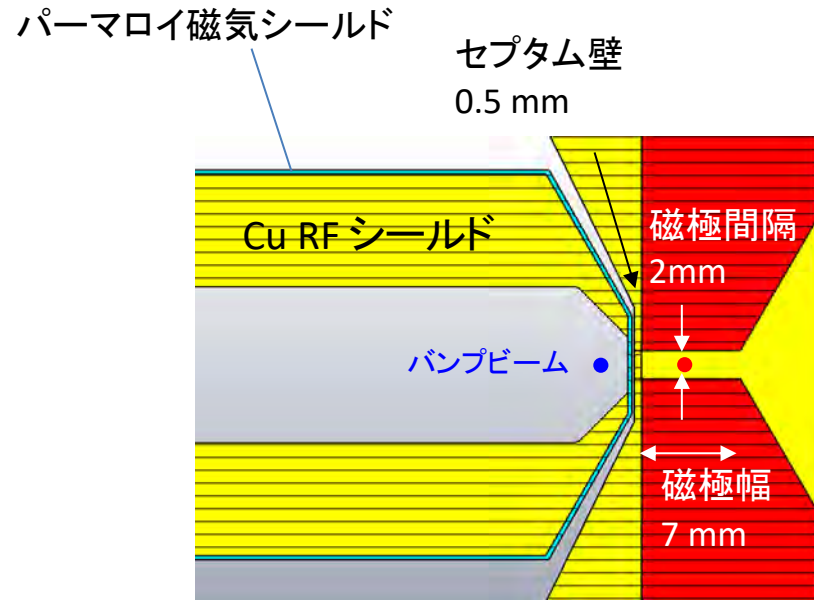
[\*2] 電源制御ユニットと出力ユニット間をCAN通信で繋いでいるため、通信規格上最大で20msの差が生じうる



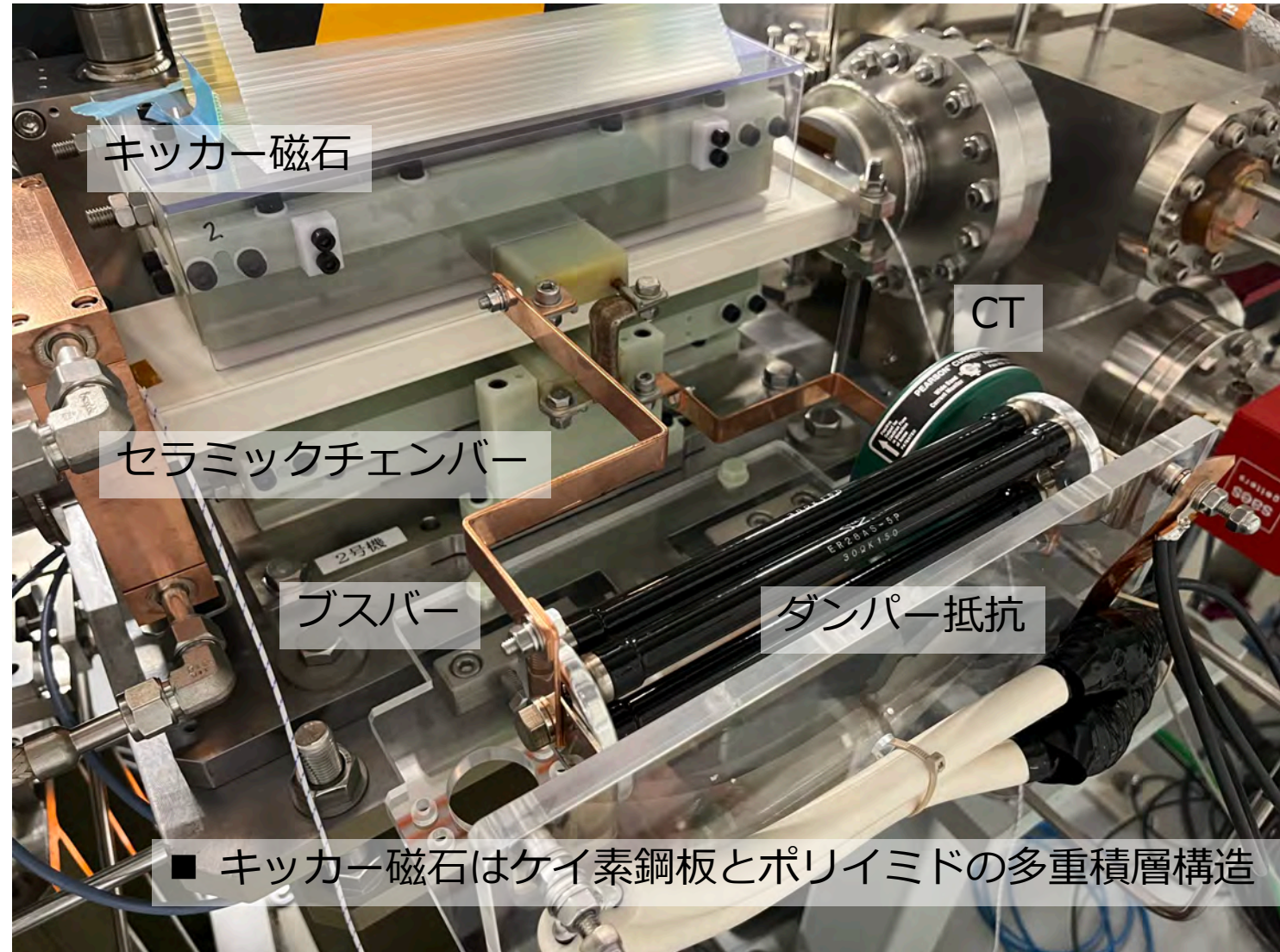
- 300V/20A電源×1台でDCセプトラム磁石2台を直列接続
- DCセプトラム磁石開発についてはPASJ2021[※]で発表済み

[※] 山口博史, et al. "次世代放射光源のためのDCセプトラム電磁石開発." PASJ2021 MOOB02..





文部科学省の科学技術試験研究委託事業  
「革新的次世代リング加速器ビーム入射部の開発」



■ キッカー磁石はケイ素鋼板とポリイミドの多重積層構造

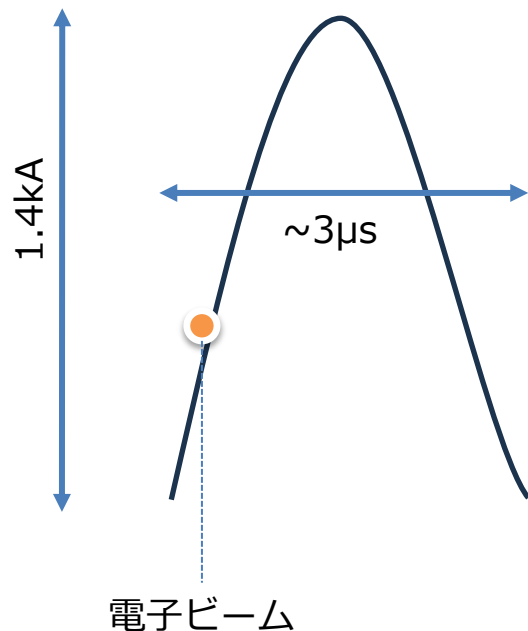
Fukami, K., et al. "Iron lamination and interlaminar insulation for high-frequency pulsed magnets." *Review of Scientific Instruments* 93.2 (2022).

- IGBTを用いた49kV/1.4kA (3.3 $\mu$ s幅) パルス電源
- 1台あたり2出力;
  - 1台のキッカー電源で  
2台のキッカー磁石に同じ出力波形を送る
  - 2台のキッカー電源の出力調整で、透明入射を実現する
  - 電流安定度 <0.2%pp

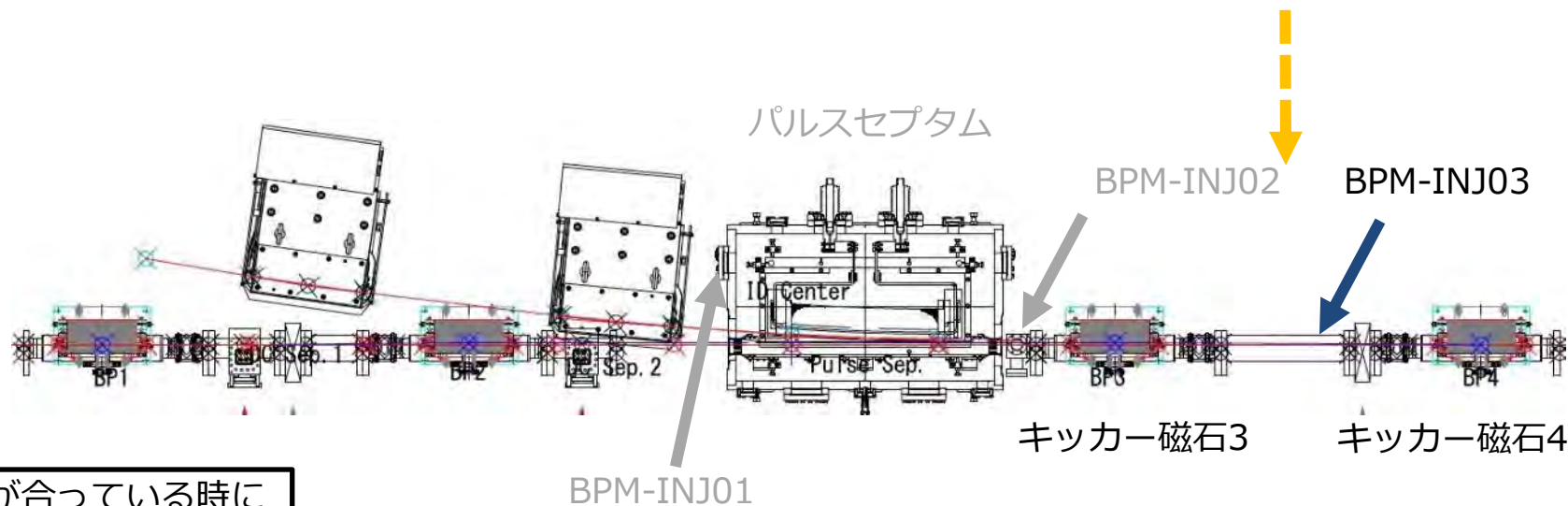
[※] Inagaki, Takahiro, et al. "Development of a solid-state pulse generator driving kicker magnets for a novel injection system of a low emittance storage ring." *Proc. IPAC'18*. 2018.



## パルス電源電流波形



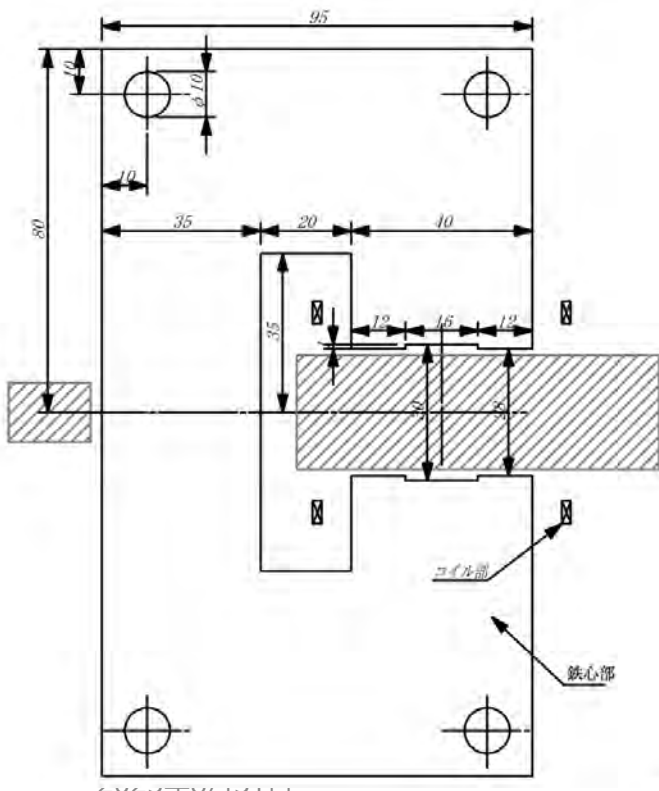
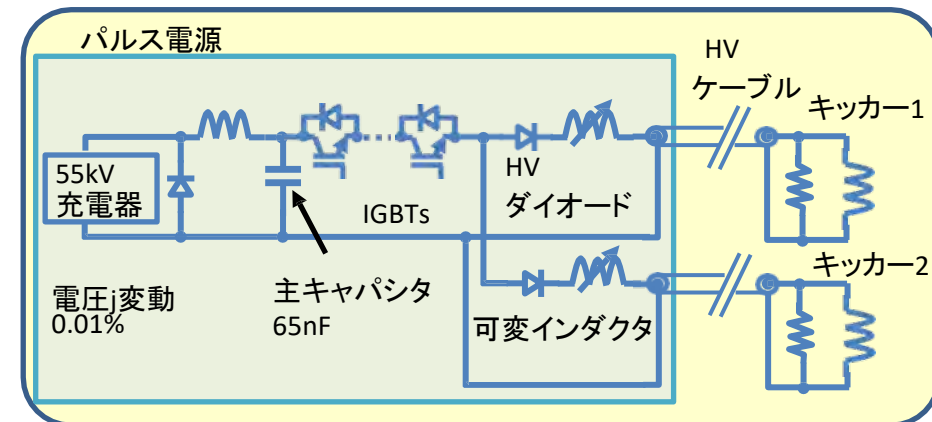
キッカー磁石はリング外方向へキックする  
(資料下方向, x軸プラス方向)



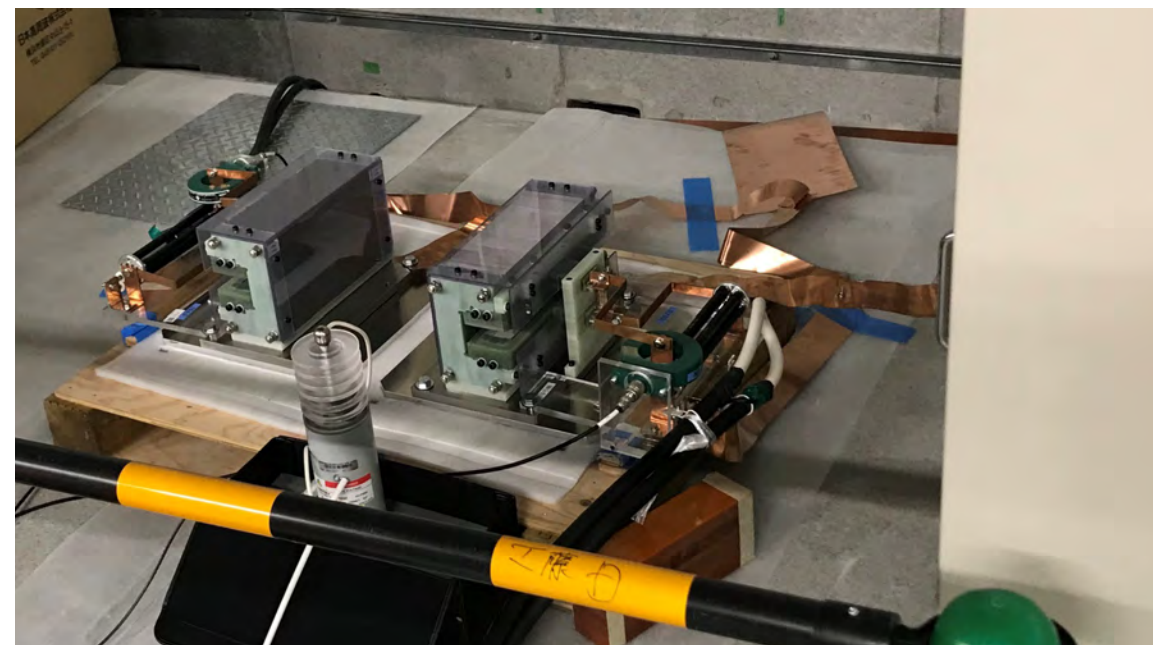
電子ビームとキッカー磁石のタイミングが合っている時に最も外周側に蹴られる。  
タイミングを変更して行った時に、BPMの位置は、電流波形と同じサインカーブになる

# ツインキッカー

- 磁極間隔28mm、全長300mm程度。積分磁場0.06Tmを生成。コイルは2ターン/磁極で、全4ターン。ピーク電流1.6kA、パルス幅3 $\mu$ s。
- 厚さ0.1mmの電磁鋼板を0.025mmの絶縁カプトンシートを間に挟みながら2000枚程度積層。薄い電磁鋼板により渦電流を抑制し、同構造積層で、同じ磁場性能のキッカー磁石を2台製作。同じロットの積層鋼板でないとキッカーの磁場特性が異なる。
- 1台のパルス電源で2台のツインキッカーを駆動する。



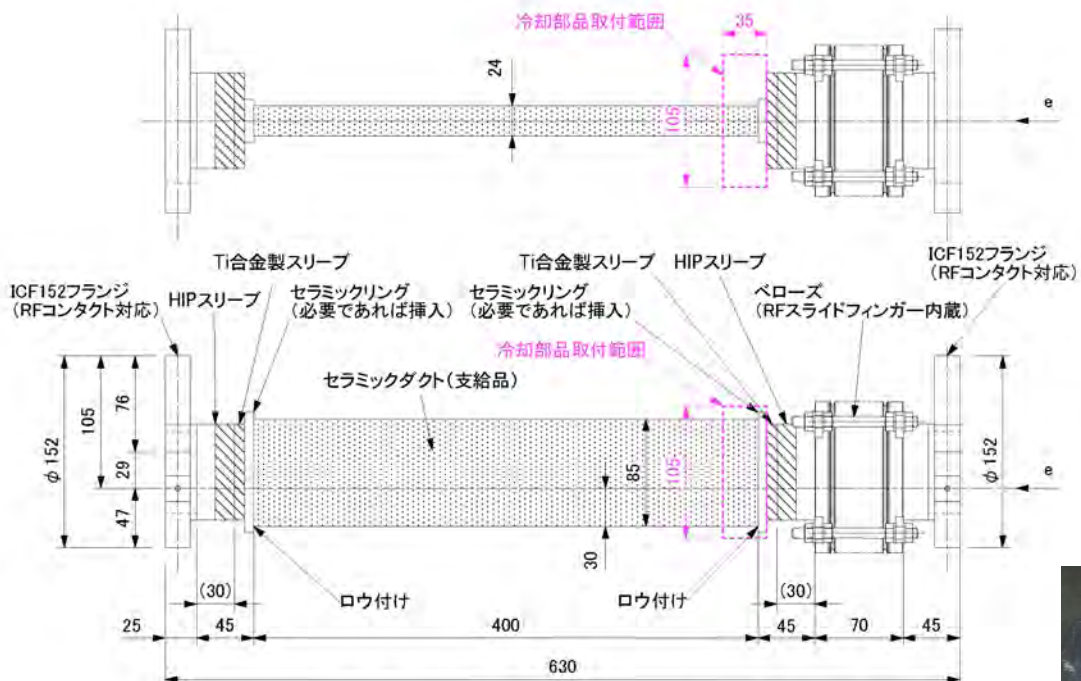
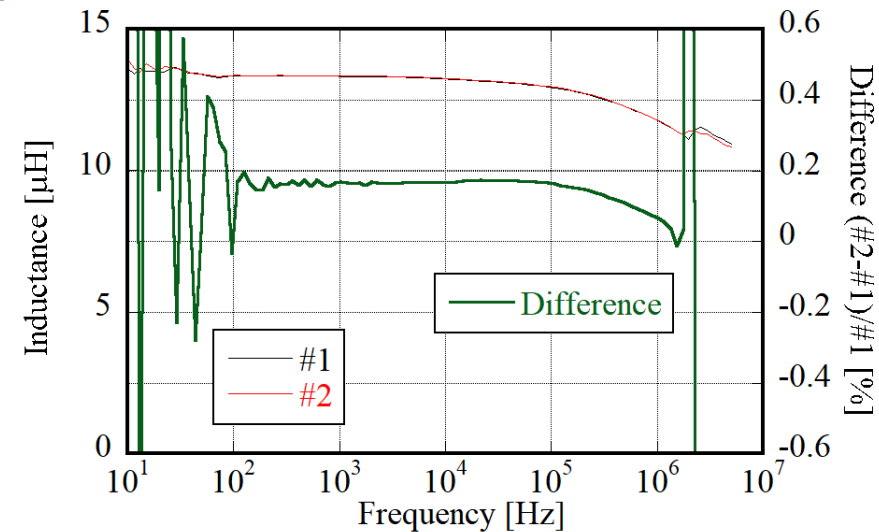
パラメータ	値
磁極間隔	28mm
磁極長	236mm
積分磁場	0.066Tm
コイルターン数	2Turns/Pole
ピーク電流	1600A
パルス波形	Half sine
パルス幅	3 $\mu$ sec
ピーク電圧	22.2kV





# ツインキッカー

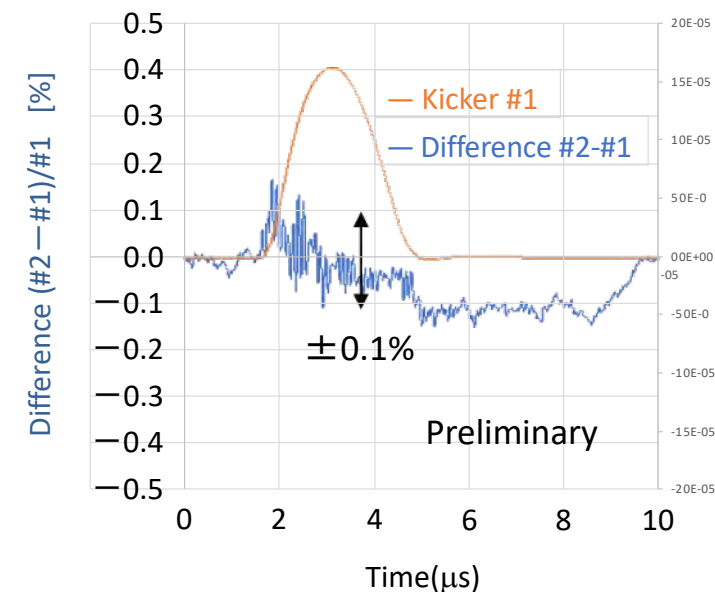
- パルス磁場中に金属真空容器を入れると渦電流が発生して、磁場が打ち消され、熱も発生するのでセラミック真空容器を用いる。電子ビームから見て真空容器が金属として連続的に繋がっていないと、電子ビームの帯びる電界が影響を受け、ビームに不安定性を与える。そこで、セラミック内面に $3\mu\text{m}$ のTiコーティングを一様に施す。将来的には、線状のコーティングとして、さらに渦電流の影響を低減する計画。
- 2台のキッカーのインダクタンス周波数依存性測定 (LCRメータ)  
パルス磁場の時間波形の比較を行い、0.1%以下の磁場性能が可能であることを実証



第1図 セラミック真空チェンバ 概念図



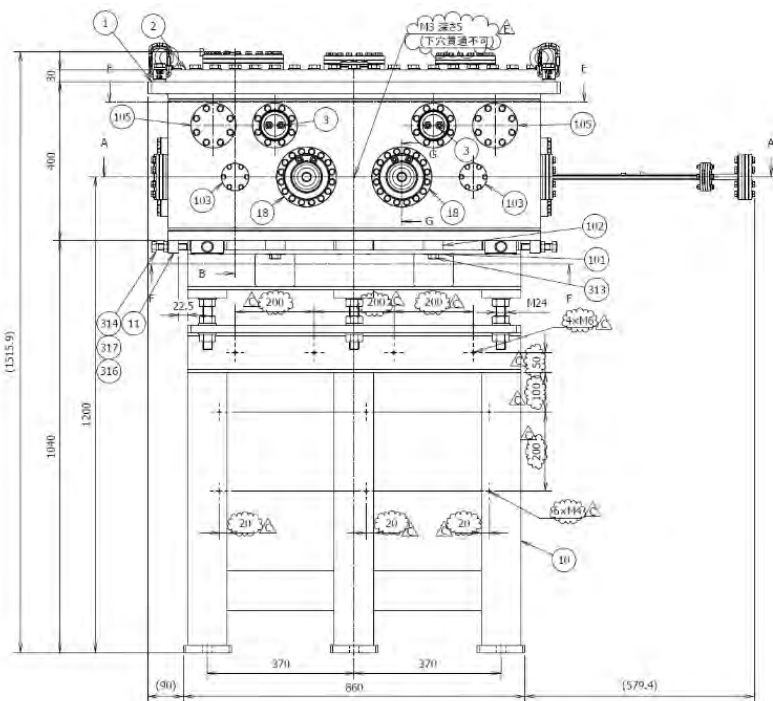
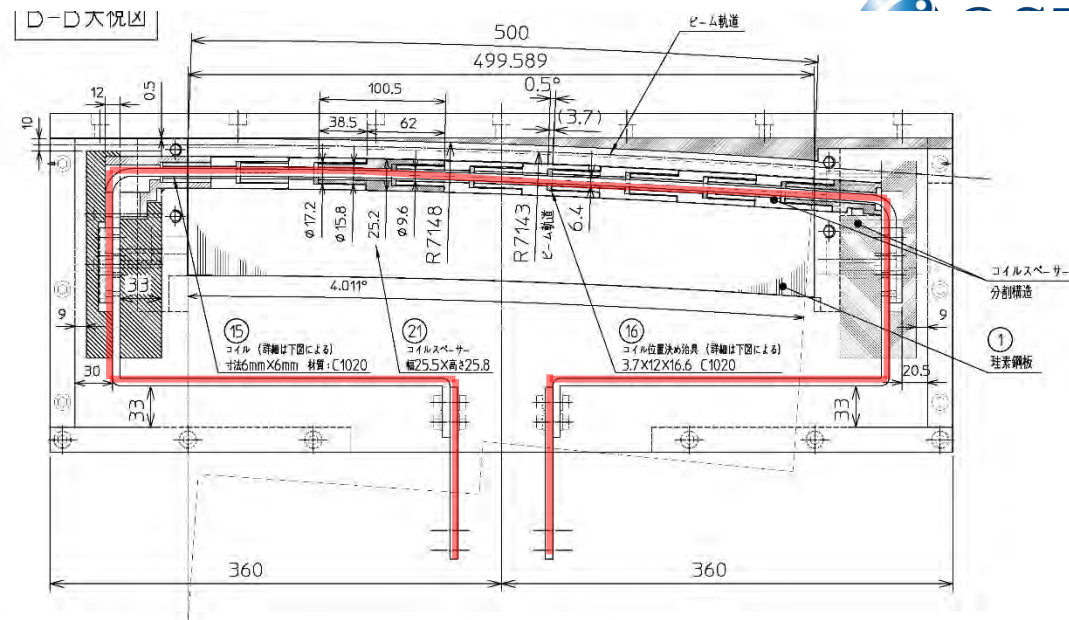
## パルス磁場の時間波形比較



Preliminary

# 真空封止パルスセプタム

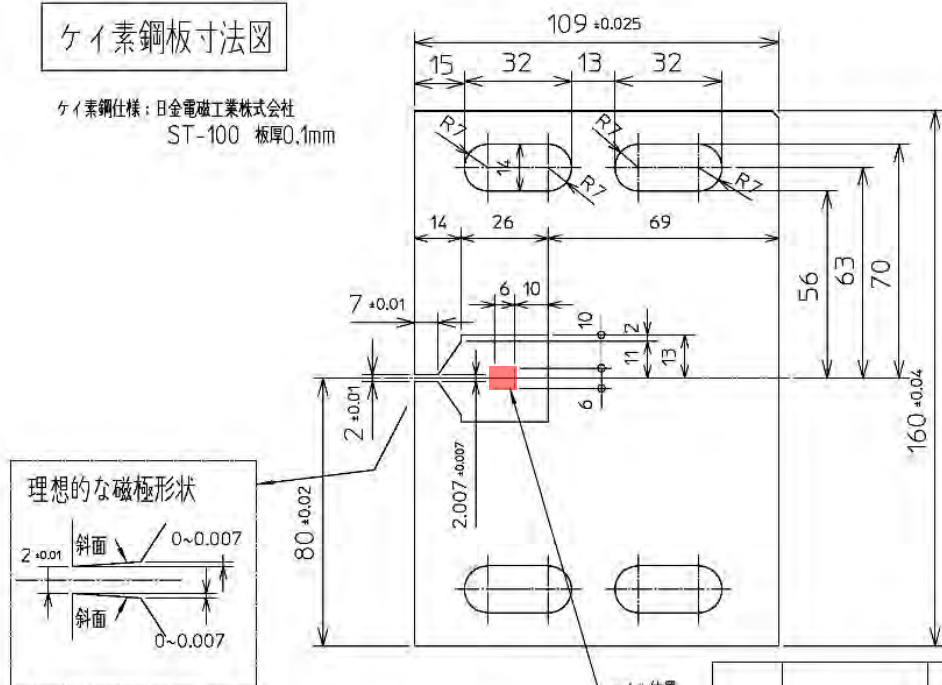
- 厚さ0.1mmの電磁鋼板を積層して長さ500mmの磁極を形成。コイルは1ターン。磁極間隔は2mm(500mmに渡って)。セプタム壁近傍まで磁場を一様にして、入射ビームを壁に近づけるため。
- 磁極とコイルを一体にして、真空容器の中に入れ、 $3 \times 10^{-8}$ Pa以下を実現



パラメータ	値
磁極間隔	2mm
磁極長	500mm
ピーク磁場	1.4 T
コイルターン数	1Turn
ピーク電流	2300A
パルス波形	Half sine
パルス幅	10μsec
セプタム壁	0.5 mm
磁気シールド厚み	<0.5 mm
リング漏洩磁場	< $10^{-5}$ Tm
真空度	< $10^{-7}$ Pa

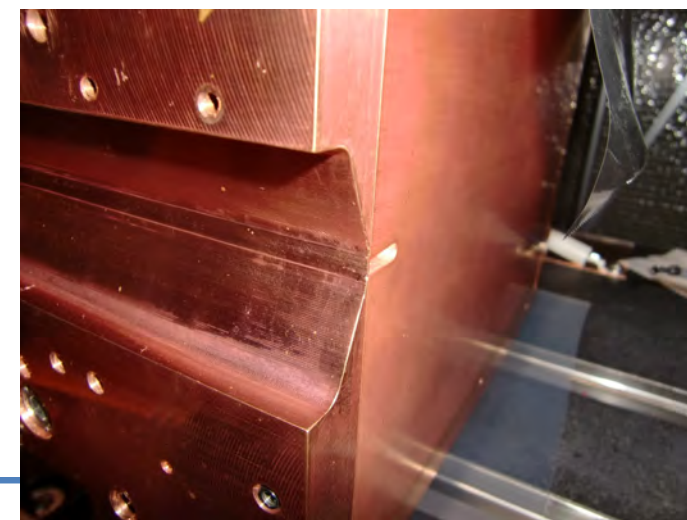
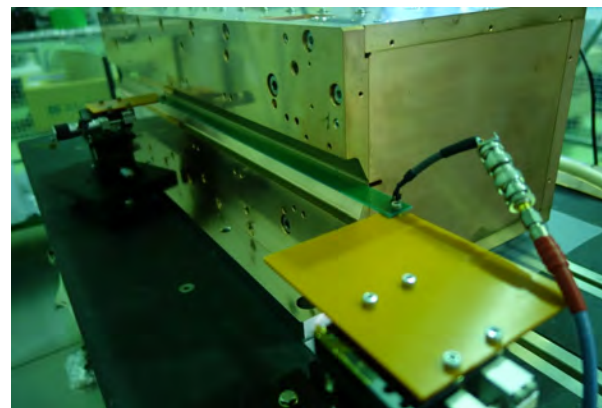
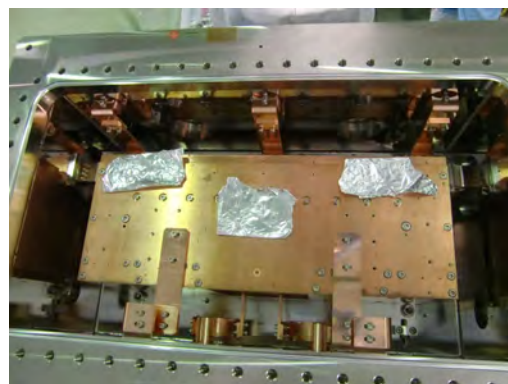
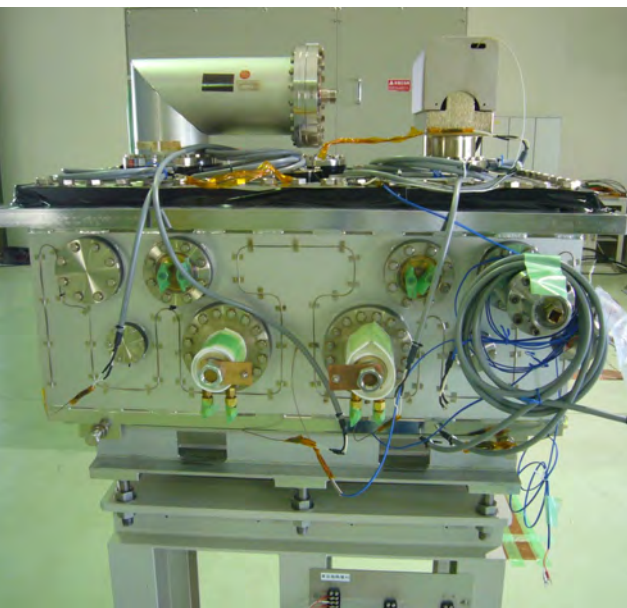
ケイ素鋼板寸法図

ケイ素鋼仕様: 日金電磁工業株式会社  
ST-100 板厚0.1mm



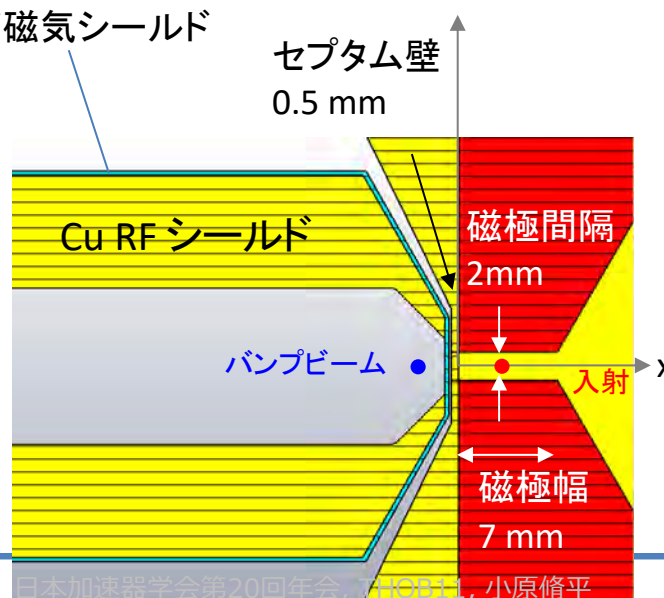
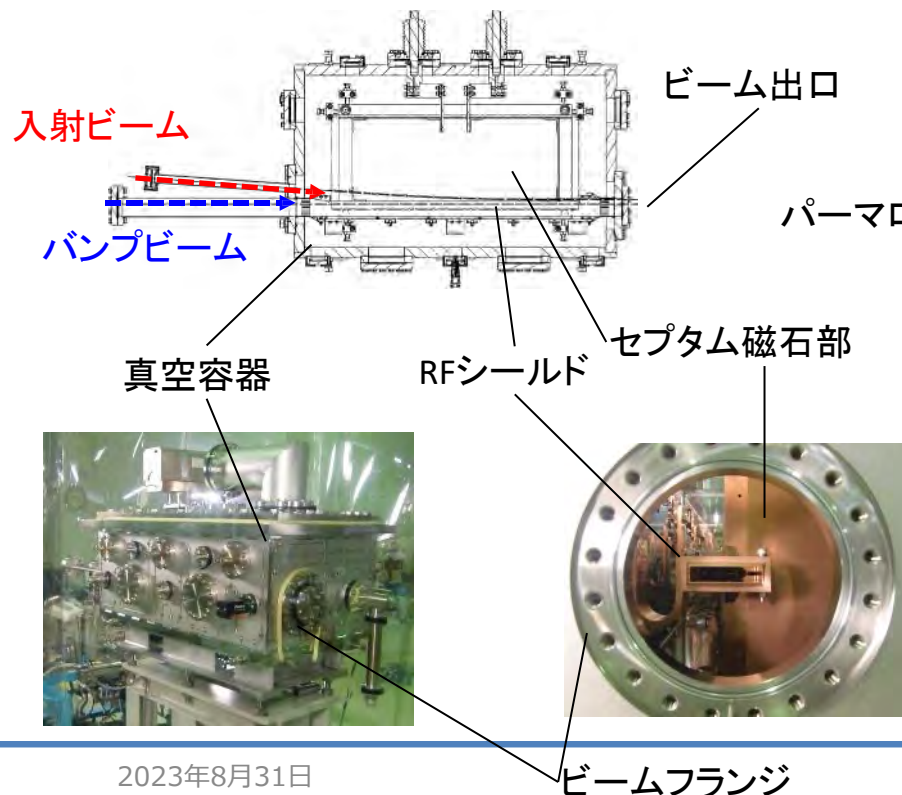
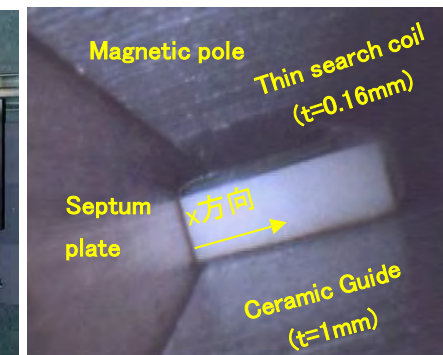
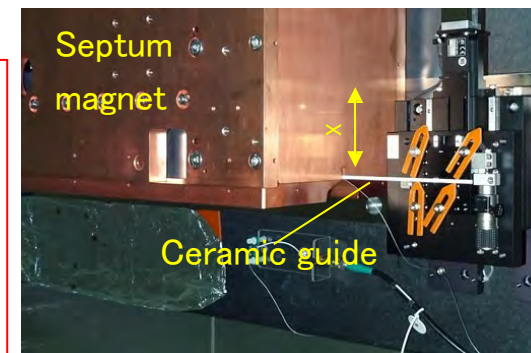
# 真空封止パルスセプタム

- 真空封止パルスセプタム内部の写真など。
- 製作は「革新的次世代リング加速器ビーム入射部の開発」による。

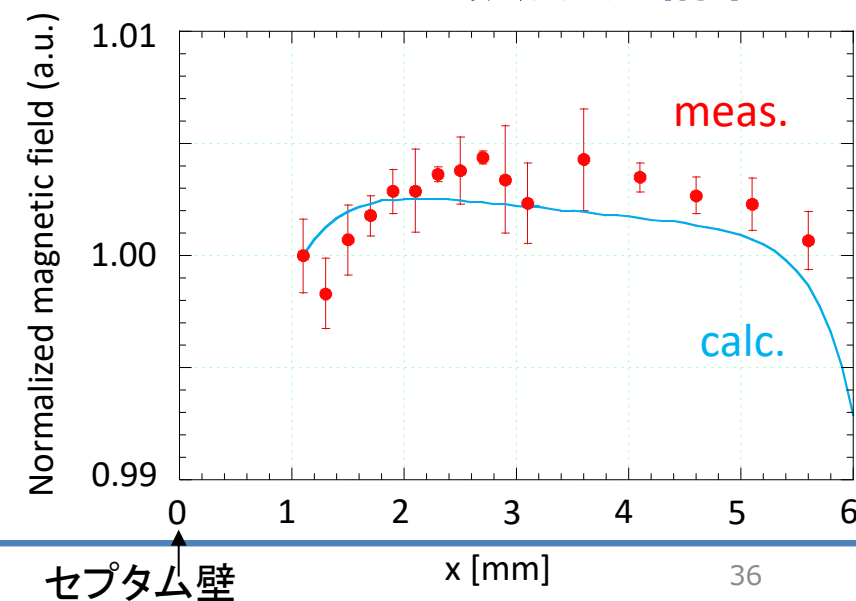


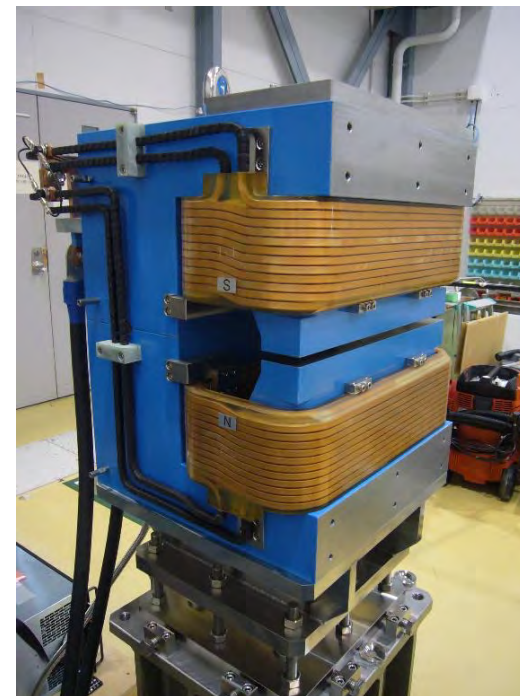
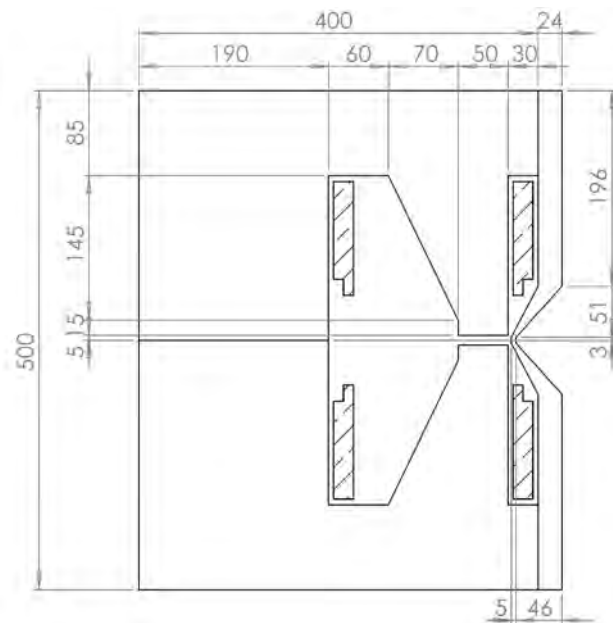
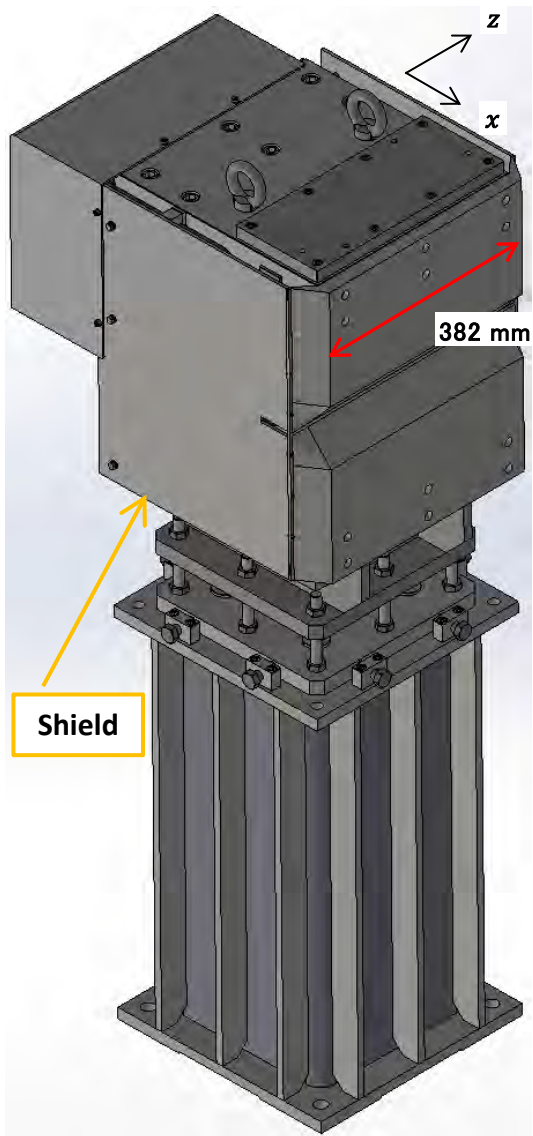
# 真空封止パルスセプタム

- セプタム壁厚さ0.5mmを実現。磁気シールドの厚みと設置誤差も含めて1mm以下を実現。
- セプタム壁の材質は銅。壁部分に生じるパルス磁場を打ち消すように渦電流が流れる。
- パルス磁場と誘導電流による磁場でキャンセルしきれない蓄積軌道上の磁場をパーマロイ磁気シールドにより遮蔽し、漏洩磁場  $< 10^{-5}$  Tmを実現。
- 一様磁場  $< \pm 0.2\%$  が得られている。セプタム壁から2mmでは充分使える。



## パルス磁場測定結果



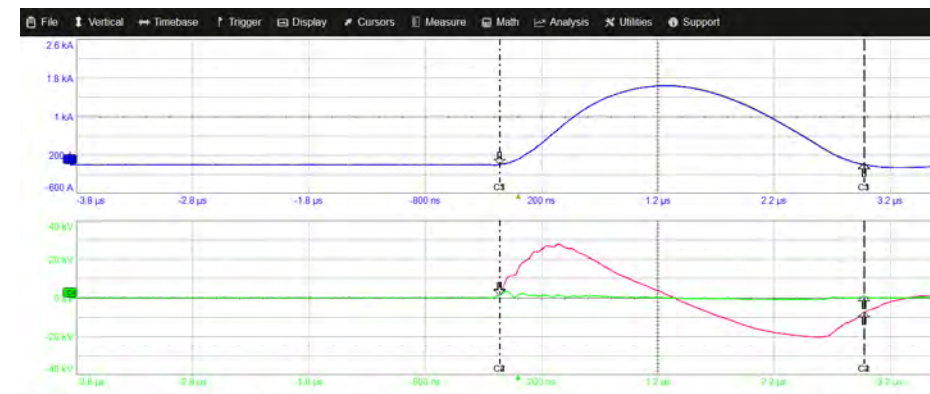
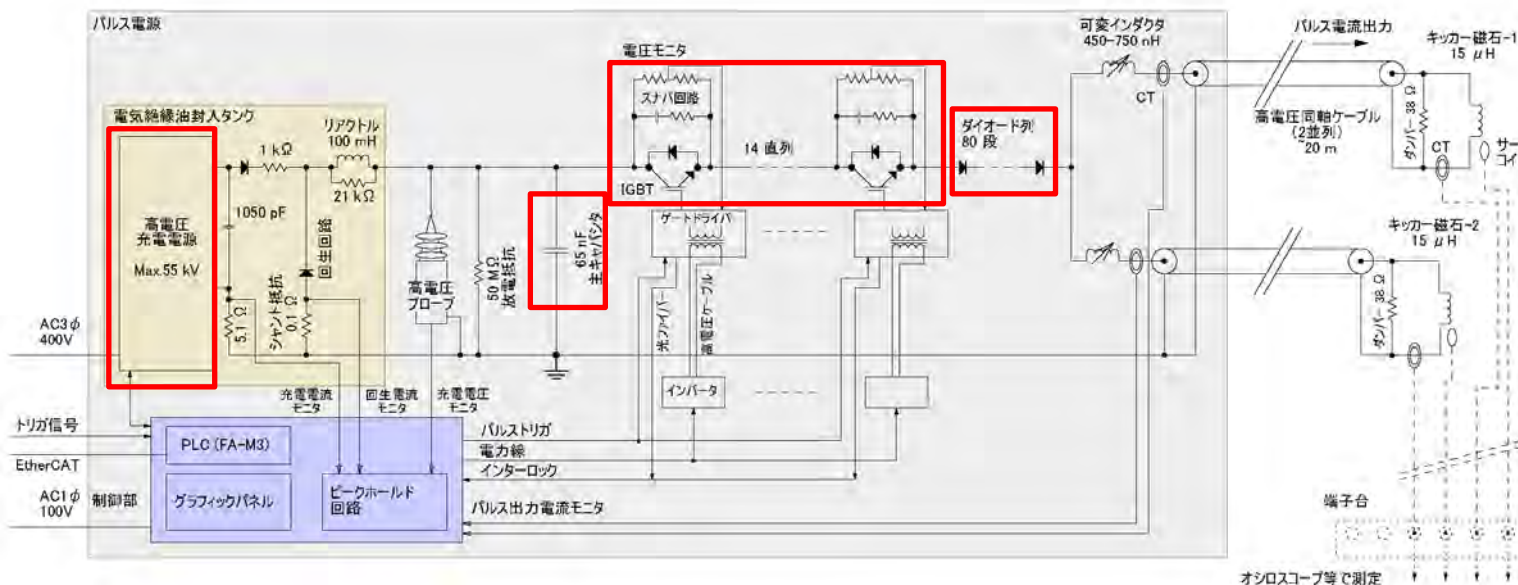


パラメータ	値
磁極間隔	10mm
磁極長	382mm
積分磁場	0.48Tm
コイルターン数	23Turns/Pole
起磁力	5332AT/Pole

- セプタム壁厚さ5mm。材質は磁極と同じ鉄。
- 漏れ磁場を鉄に吸わせて蓄積軌道上に漏らさない。

## 電源原理概要:

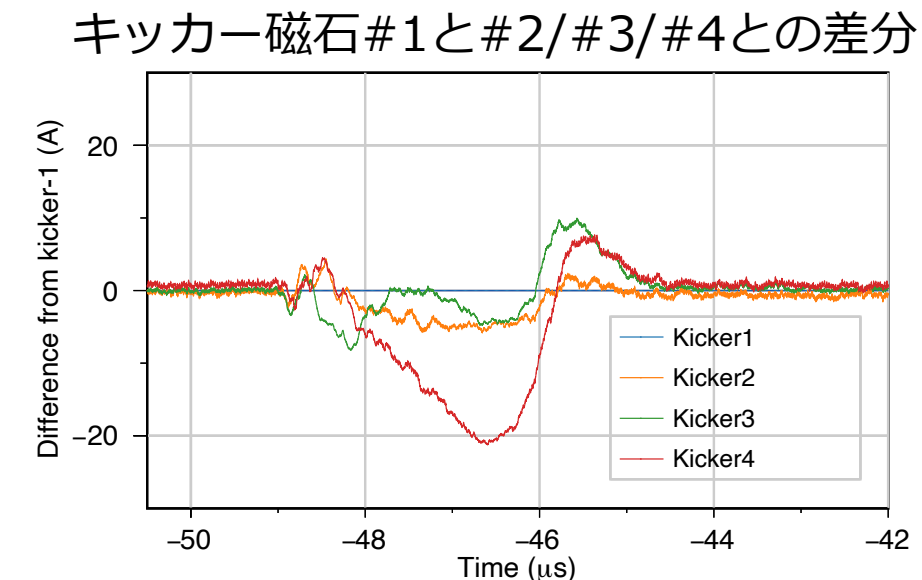
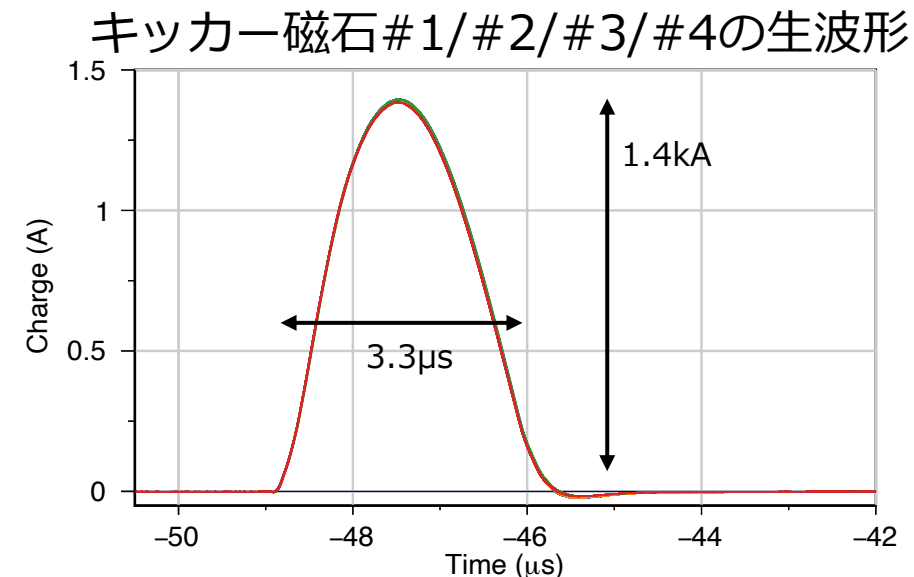
- 充電電源で主キャパシタに最大+55kVまで充電。
- 14直列トランジスタ(IGBT)を導通させ、正弦半波パルス電流出力。
- 80段ダイオード列後、分岐して高電圧同軸ケーブルでキッカー電磁石を励磁。
- キッカー電磁石と並列のダンパー抵抗でインピーダンス整合。
- 電磁石パルス電流調整のため可変インダクタを設置。



オシロスコープ等で測定

- 実際にパルス電源からキッカー磁石への通電を行い、電流波形を確認
- 定格49kV-1.4kA
  - 0.1%精度の相似性のためには波形のズレは1.4A以内である必要がある
  - キッカー磁石#4だけズレが大きいので電源内でインダクタンスの再微調整の余地有り
  - タイミングはトリガー発行で調整可能

- 電源に用いているダイオード(CKE社製 CKF12P100D1D)が廃盤
  - 世の中の在庫をかき集めて予備品のこり45個
  - 課題 ;
    - 代替品(オリジン電子社製 USR100PP12A)試験
    - 実際に使用して同じ波形出力できるかを今後調査



※ 波形データは2023年11月時点でのものであり、現在調整中です

